

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

APPORT DE L'ANALYSE DES TOURMALINES ET DES PYRITES À LA  
GENÈSE DES GISEMENTS OROGÉNIQUES ARCHÉENS DU DISTRICT DE  
VAL-D'OR, ABITIBI, CANADA

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR  
LUCILLE DAVER

AOÛT 2017

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Michel Jébrak qui m'a fait confiance en me choisissant pour ce projet de maîtrise. Grâce à lui, j'ai eu l'opportunité de construire et mener un projet scientifique, d'effectuer un bon nombre d'analyses et d'aller présenter mes recherches dans plusieurs congrès. Tout cela m'encourageant et me poussant à aller toujours plus loin. Cela restera une expérience enrichissante et inoubliable, pleine de rencontres et d'aventures. J'obtiens bien plus qu'un diplôme avec ce mémoire. Cela vient avec une expérience de vie qui m'aura beaucoup appris sur moi-même et ce drôle de monde qu'est la science.

Je remercie Christian Sasseville pour tout ce qu'il m'a appris en laboratoire, en méthodologie et en culture québécoise ! Je n'oublie pas Raynalde Lapointe qui m'a patiemment formé sur de nombreux instruments de laboratoire.

Avec ce projet, j'ai découvert mes fascinantes tourmalines et je remercie Vincent Van Hinsberg et George Beaudoin pour m'avoir aidé à décrypter leurs mystères. Je remercie Brandon Boucher pour les magnifiques cartographies de pyrite qu'il a effectué et Robert Trumbull pour les analyses de  $\delta^{11}\text{B}$ . Merci à Stéphane De Souza pour ses précieux conseils.

Je remercie l'équipe du labo toute entière Denise, Kristina, Sacha, James et particulièrement Christophe. Ses conseils ont eu un impact formidable sur ce mémoire. Si tes choix t'amènent à l'être, tu seras un excellent superviseur.

Enfin, je remercie ma famille et Guillaume. Indéfectible, vous êtes là pour moi quoiqu'il arrive. Merci d'être là.

## TABLE DES MATIÈRES

|  |      |
|--|------|
| REMERCIEMENTS.....                                       | ii   |
| TABLE DES MATIÈRES .....                                 | iii  |
| LISTE DES FIGURES .....                                  | v    |
| LISTE DES TABLES .....                                   | x    |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS.....                              | xii  |
| RÉSUMÉ .....   | xiii |
| INTRODUCTION .....                                       | 1    |
| CHAPITRE I : CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL .....          | 5    |
| 1.1 La Province du Lac Supérieur.....                    | 6    |
| 1.2 La sous-province de l'Abitibi .....                  | 7    |
| 1.3 Géologie du district de Val-d'Or .....               | 11   |
| 1.3.1 Le district minier      11                         |      |
| 1.3.2 Le pluton de Bourlamaque      15                   |      |
| 1.3.3 Les mines étudiés      16                          |      |
| 1.4 Synthèse chronologique.....                          | 21   |
| CHAPITRE II : MÉTHODOLOGIE .....                         | 23   |
| 2.1 Échantillonnage.....                                 | 24   |
| 2.2 Désagrégation .....                                  | 25   |
| 2.2.1 Le broyeur à mâchoires                             | 25   |
| 2.2.2 Le broyeur électrique                              | 25   |
| 2.3 Le tamisage .....                                    | 27   |
| 2.4 La séparation par densité .....                      | 27   |
| 2.5 Les analyses .....                                   | 29   |
| 2.5.1 Lames minces                                       | 29   |
| 2.5.2 Minéraux isolés                                    | 29   |
| 2.5.3 Par fraction granulométrique                       | 35   |
| 2.5.4 Traitement des données analytiques                 | 36   |
| CHAPITRE III : RÉSULTATS .....                           | 39   |
| 3.1 Association minérale dans la région de Val-d'Or..... | 40   |
| 3.1.1 Goldex   | 40   |



|  |     |
|--|-----|
| 3.1.2 Lamaque  | 45  |
| 3.1.3 Lac Herbin   | 53  |
| 3.1.4 Beaufor  | 57  |
| 3.2 Les Tourmalines.....   | 61  |
| 3.2.1 Problématique spécifique   | 62  |
| 3.2.2. Résultats   | 62  |
| 3.3 Les pyrites.....   | 84  |
| 3.3.1 Cartographie des pyrites   | 84  |
| 3.3.2 Synthèse des cartographies de pyrites  | 92  |
| 3.4 Synthèse des résultats .....   | 94  |
| CHAPITRE IV : DISCUSSION .....   | 97  |
| 4.1 Les minéralisations sont-elles toutes identiques ? .....                                 | 98  |
| 4.2 Relations temporelles.....   | 101 |
| 4.3 Comparaisons.....  | 103 |
| 4.4 Interprétations génétiques .....   | 106 |
| CONCLUSION.....  | 110 |
| ANNEXE A PROTOCOLES D'UTILISATION .....  | 114 |
| ANNEXE B RÉSULTATS DES MESURES XRD SUR LES<br>GRANULOMÉTRIES CHOISIS .....                   | 128 |
| ANNEXE C PHOTO SEM DES TOURMALINES ANALYSEES AU LA-ICP-<br>MS APRES LEUR ABLATION LASER..... | 130 |
| ANNEXE D RESULTATS DES ANALYSES LA-ICP-MS DES 47<br>TOURMALINES ANALYSÉES.....               | 133 |
| ANNEXE E RÉSULTATS DES ANALYSES ISOTOPIQUE POUR LE BORE<br>DANS LES TOURMALINES (SIMS).....  | 151 |
| RÉFÉRENCES .....   | 156 |

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1. 1 :</b> Carte géologique et gîtologique simplifiée de la Sous-province de l'Abitibi, avec les principaux gisements de métaux de base et précieux. Dans le sud se trouvent les failles Porcupine-Destor et Cadillac Larder Lake (Jébrak et Marcoux, 2008).....  | 8  |
| <b>Figure 1. 2 :</b> Carte géologique simplifiée de la zone tectonique de Cadillac, avec les principales mines d'or et de métaux du district. PDFZ=Zone tectonique de Porcupine-Destor et ZFLLC= zone faille de Larder Lake-Cadillac (modifié de Lemarchand, 2012). .....   | 9  |
| <b>Figure 1. 3 :</b> Carte géologique simplifiée du district minier de Val d'Or-Malartic. ZFLLC= zone de faille de Larder Lake- Cadillac (modifié de Lemarchand, 2012). .....   | 12 |
| <b>Figure 1. 4 :</b> Carte géologique simplifiée du district minier de Val d'Or, avec la localisation des mines ciblées (modifiée de Lemarchand, 2010). .....   | 17 |
| <b>Figure 1. 5 :</b> Carte de la mine Lamaque distinguant les zones Triangle et Parallèle. Les cibles d'explorations sont des sites non exploités mais étudiés pour en déterminer l'intérêt (Poirier <i>et al.</i> , 2015). .....   | 19 |
| <b>Figure 1. 6 :</b> Compilation des données géochronologiques de la région de la Province du Supérieur. 1 : Percival, 2007 ; 2 : Feng et al., 1992 ; Powel et al., 1995 ; 3 : Pilote et al., 2000 ; 4 : Wong et al., 1991 ; 5 : Goutier et Malencon, 2010 ; 6 : Davis, 2002 ; 7 : Daigneault et Mueller, 2004..... | 22 |
| <b>Figure 2. 1 :</b> Méthodologie utilisée au cours cette étude. ....   | 24 |
| <b>Figure 2. 2 :</b> Montage et mécanisme formant le broyeur à mâchoire. ....   | 26 |
| <b>Figure 2. 3 :</b> Mécanisme du mortier électrique RM200.....   | 26 |
| <b>Figure 2. 4 :</b> Montage permettant la séparation par densité des sulfures inspirée du travail de Norbert Clauer pour les argiles. ....   | 28 |
| <b>Figure 2. 5 :</b> Fractions rangées par granulométrie, sèche et séparées par densité (léger et lourd).....   | 28 |
| <b>Figure 2. 6 :</b> Supports utilisés pour les analyses des minéraux au SEM-EDX. Les minéraux sont fixés sur un collant en carbone et rangés par granulométrie. Le support de gauche correspond aux pyrites de Lamaque et le support de droite aux   |    |

tourmalines de Lac Herbin. La dernière image est une photo prise par le SEM d'une pyrite. ....30

**Figure 2. 7 :** LA-ICP-MS de UNB (a) est la partie laser dans lequel les minéraux sont placés et (b) le spectromètre de masse.

**Figure 2. 8 :** Cartographie de pyrite par méthode de ligne par le LA-ICP-MS à laser Resonetics S-155-LR 193nm Excimer couplé avec un spectromètre de masse à source plasma Agilent 7700x quadrupole du laboratoire de Chris Farlane à UNB. ....32

**Figure 2. 9 :** Montage en epoxy contenant les tourmalines. La surface est légèrement abrasée puis polie pour être capable d'analyser l'intérieur des minéraux. Le montage est divisé en six sections contenant une vingtaine de tourmalines de différentes granulométries chacune.....34

**Figure 2. 10 :** SIMS 1280-HR au GFZ de Potsdam, Allemagne, servant aux analyses de l'isotope du Bore dans les tourmalines. Les échantillons sont placés dans le coffret à gauche de l'image et envoyés vers la droite où se trouve le spectromètre de masse. ....34

**Figure 2. 11 :** Plateforme iolite affichant le spectre transmis par le LA-ICP-MS. Chaque pic correspond à une analyse. Les pics les plus hauts correspondent aux analyses de standards (NIST 610, NIST 612 et NIST 614) et les plus bas aux tourmalines.....37

**Figure 3. 1 :** Échantillon analysé de Goldex. Il contient de la chlorite, des feldspaths et un assemblage de quartz-carbonate séparé des feldspaths plagioclase par une veine de tourmaline. Il contient des pyrites mm à  $\mu\text{m}$  disséminé dans le feldspath et la chlorite. ....40

**Figure 3. 2 :** Lame mince issue de l'échantillon 91 de Goldex. Une alternance successive de quartz-carbonate (A et B), tourmaline (A), feldspath plagioclase (B, C et G) et chlorite (D) caractérise la lame. Des pyrites mm à  $\mu\text{m}$  cubiques sont disséminées dans la lame (E). Les plus massives contiennent des inclusions de barytine (E). La lame contient également de l'hématite spéculaire (F) et du rutile (G). ....44

**Figure 3. 3 :** Échantillon 85 (a) et 87 (b) de la zone Triangle et 88 (c) de la zone Parallèle. Ils présentent le même assemblage pyrite-quartz-tourmaline. Le 85 contient des zones à chlorite qui augmentent sur le 87.....46

**Figure 3. 4 :** Lame mince de l'échantillon 85 de Lamaque zone Triangle. La lame est composée de tourmaline, muscovite, biotite (A), quartz (B), feldspath (C), dolomite (D et E) et pyrite (F). Tl= tourmaline, Msc=muscovite, Bt=biotite, Qtz=quartz, Dol=dolomite, Fsp=feldspath, Py= pyrite .....50

- Figure 3. 5 :** Lame mince de l'échantillon 87 de Lamaque zone Triangle présente du quartz directionnel, chlorite, tourmaline (A et D). Les pyrites sont cubiques avec des ombres de chlorites (B, C et E). .....51
- Figure 3. 6 :** Lame mince 88 de l'échantillon Lamaque zone Parallèle présente des pyrites altérées (A à E) avec de nombreuses inclusions de tourmalines et muscovites (F).....52
- Figure 3. 7 :** Échantillon 73 de la mine Lac Herbin.....54
- Figure 3. 8 :** Lames minces issues des échantillons 73 de Lac Herbin. Les pyrites sont très altérées et fissurées (A, B, D, E, F et G) avec des inclusions de tourmaline, muscovite (A), hématite (B), chlorite (D) et de barytine (E). .....56
- Figure 3. 9 :** Échantillon 10 de la mine Beaufor .....58
- Figure 3. 10 :** Lames minces issues des échantillons (a) 9, (b) 10-1 et (c) 10-2 de la mine Beaufor. Les pyrites présentent des cœurs poreux et des inclusions de chalcoppyrite (A, B et D). La muscovite et la tourmaline sont en inclusion sur le quartz (C et F). .....60
- Figure 3. 11 :** Diagramme de classification des tourmalines basée sur l'occupation du site X d'après Henry *et al.* (2011), des tourmalines de Val-d'Or. ....63
- Figure 3. 12:** (a) Diagramme Al-Fe-Mg de classification des sous-types des tourmalines de Val-d'Or et (b) Diagramme  $Mg/(Fe+Mg)$  vs  $Na/(Na+Ca)$  de classification des sous-types des tourmalines de Val-d'Or.....66
- Figure 3. 13 :** Composition chimique des tourmalines analysées en ppm.  $Fe/(Fe+Mg)$  en fonction de Ti, Ca, Na, Al, Mn, Cr, et K. Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) et Beaufor.....67
- Figure 3. 14 :** Composition chimique des tourmalines analysées en ppm. FeO en fonction de  $TiO_2$ , CaO,  $Na_2O$ , MgO,  $Al_2O_3$ , MnO,  $Cr_2O_3$  et  $K_2O$ . Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) et Beaufor (10). .....68
- Figure 3. 15 :** Composition chimique des tourmalines analysées en ppm.  $K_2O$  en fonction de  $TiO_2$ , CaO,  $Na_2O$ , MgO,  $Al_2O_3$ , MnO,  $Cr_2O_3$  et FeO. Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) et Beaufor (10). .....69
- Figure 3. 16 :** Composition chimique des tourmalines analysées en ppm. Na en fonction de K. Le rapport Na/K augmente avec la pression. Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) et Beaufor (10). .....70

- Figure 3. 17 :** Composition en éléments traces des tourmalines analysées normalisées au manteau primitif (McDonough et Sun 1995). Les mesures sont faites par LA-ICP-MS pour les échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87), Lac Herbin (73) et Beaufor (10). .....73
- Figure 3. 18 :** Diagramme binaire de Ca, Na, Fe, K en fonction des éléments mineurs V et Sr. ....72
- Figure 3. 19 :** Diagramme Fe/(Fe+Mg) en fonction des éléments traces.....76
- Figure 3. 20 :** Composition en terres rares des tourmalines normalisée au chondrite (Nakamura, 1974) ; échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) et Beaufor (10). ....77
- Figure 3. 21 :** Diagramme binaire d'Eu en fonction des éléments traces Ca, Li, Sr .....78
- Figure 3. 22 :** Histogramme des valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  des tourmalines des gisements Goldex, Lamaque, Lac Herbin et Beaufor. Les barres hachurées sont les données de Beaudoin (2013). .....82
- Figure 3. 23 :** Cartographie LA-ICP-MS d'une pyrite sélectionnée du gisement Lac Herbin. Les cartes sont effectuées pour les éléments suivants : Ag, As, Au, B, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mo, Ni, Pb, S, Se, Ti, Tl, V, W et Zn. L'échelle colorimétrique représente la concentration de chaque élément en ppm. Ces cartographies mettent en évidence trois générations de pyrite et une phase oxydante. ....86
- Figure 3. 24 :** Photographie d'une pyrite du gisement Lac Herbin par LA-ICP-MS. Les lignes représentent les limites des différentes générations de pyrite et les pointillées l'extrapolation de ces pyrites. La couleur noire représente la première génération de pyrite. Elle contient de l'or dans ses inclusions. Le bleu représente les contours de la seconde génération de pyrite fortement zonée en As, Co et Ni. Le vert représente la troisième génération de pyrite, sans inclusion et tardive. Les pointillés rouges représentent le halo de barytine et de tourmaline entourant la première pyrite. Les courbes blanches entourent les inclusions de barytine et tourmaline restantes. Py=pyrite. ....89
- Figure 3. 25 :** Cartographie LA-ICP-MS d'une pyrite sélectionnée du gisement Goldex. Les cartes sont effectuées pour les éléments suivants : Ag, As, Au, B, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mo, Ni, Pb, S, Se, Ti, Tl, V, W et Zn. L'échelle colorimétrique représente la concentration de chaque élément en ppm. Ces cartographies mettent en évidence trois générations de pyrite et une phase oxydante. ....90

**Figure 3. 26 :** Photographie d'une pyrite du gisement Goldex par LA-ICP-MS. Les lignes représentent les limites des différentes générations de pyrite. La couleur noire représente la première génération de pyrite. Elle est incluse et riche en éléments mafiques. Elle contient de l'or en inclusion. Le bleu représente les contours de la deuxième génération de pyrite en As, Co, Ni et Se. Le vert représente la troisième génération de pyrite, sans inclusion et tardive. Les courbes blanches entourent les inclusions de la phase oxydante à l'interface des deux générations de pyrites. Py=pyrite.....91

**Figure 3. 27 :** Schéma synthétique de la succession de cristallisation de pyrite et tourmalines dans les veines minéralisées de Lac Herbin et Goldex. ....93

**Figure 4. 1 :** Synthèse des principales caractéristiques des gisements étudiés.....110

**Figure 5. 1 :** Synthèse de l'évolution des veines quartz-tourmaline-carbonate. La phase 1 forme des pyrites aurifères riches en inclusion dans un contexte réducteur, avec des fluides métamorphiques d'origine profonde. La phase 2 est oxydante, liée à l'interaction des fluides métamorphiques avec un fluide supercrustal oxydé et sulfaté. Ce fluide supracrustal pourrait correspondre à de l'eau de mer archéenne évoluée piégée dans la porosité des roches volcaniques lors d'une phase d'altération hydrothermal sous-marine ou de déformation régionale. Ce fluide cristallise des dravites et des barytines. La chimie des tourmalines est différentes suivant l'encaissant des veines. À l'est dans le pluton de Bourlamaque les valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  sont plus élevées ( $\delta^{11}\text{B}$  moyen de -11,2 ‰ à -7,7 ‰) que celles à l'ouest dans les granodiorites ( $\delta^{11}\text{B}$  moyen de -15,6 ‰ à -9,1 ‰). La phase 3 et 4 sont à pyrite non aurifère riche en arsenic et à schorl avec un retour à un contexte réducteur. La période de temps entre chaque étape est inconnue. ....114

## LISTE DES TABLES

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 3. 1 :</b> Tableau présentant la provenance des échantillons étudiés : la mine, l'encaissant, la formation géologique, le type de gisement, la compagnie et la provenance de l'échantillon dans la mine. En grise sont les échantillons analysés .....   | 41 |
| <b>Tableau 3. 2 :</b> Minéralogie de l'échantillon 91 de Goldex observé à la binoculaire et au SEM-EDX et mesure au XRD. ....   | 43 |
| <b>Tableau 3. 3 :</b> Minéralogie de l'échantillon 85 de la zone Triangle de Lamaque. Les minéraux sont identifiés par binoculaire et MEB-EDX. ....   | 47 |
| <b>Tableau 3. 4 :</b> Minéralogie de l'échantillon 87 de la zone Triangle de Lamaque. Les minéraux sont identifiés par binoculaire et MEB-EDX et leur proportion mesurée par XRD.....   | 48 |
| <b>Tableau 3. 5 :</b> Minéralogie de l'échantillon 88 de Lamaque zone Parallèle. Les minéraux sont identifiés par binoculaire et MEB-EDX.....   | 49 |
| <b>Tableau 3. 6 :</b> Minéralogie de l'échantillon 73 de Lac Herbin les minéraux sont identifiés par binoculaire et MEB-EDX. ....   | 55 |
| <b>Tableau 3. 7 :</b> Minéralogie de l'échantillon 10 de Beaufor les minéraux sont identifiés par binoculaire et MEB-EDX et leur proportion mesurée par XRD.....  | 59 |
| <b>Tableau 3. 8 :</b> Résumé des concentrations en éléments majeurs dans les tourmalines du district de Val-d'Or en wt % et en cation avec si=6 et 29 oxygènes. Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons de Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87), Lac Herbin (73) et Beaufor (10). Var = variation ; Moy = moyenne ; ET= écart type. .... | 64 |
| <b>Tableau 3. 9 :</b> Synthèse des concentrations en éléments traces dans les tourmalines du district de Val-d'Or en ppm. Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons de Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) Lac Herbin (73) et Beaufor (10). ....  | 73 |
| <b>Tableau 3. 10 :</b> Synthèse des concentrations relatives entre les tourmalines des échantillons de Goldex (91), Lamaque (85, 87 et 88), Lac Herbin (73) et Beaufor (10). ....   | 75 |
| <b>Tableau 3. 11 :</b> Synthèse des concentrations des terres rares dans les tourmalines du district de Val-d'Or en .....   | 79 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tableau 3. 12 :</b> Composition moyenne en $\delta^{11}\text{B}$ des tourmalines analysées de Goldex (91), Lamaque (85, 87 et 88), Lac Herbin (73) et Beaufor (10). ..... | 82  |
| <b>Tableau 4 1 :</b> Synthèse minéralogique des veines QTC des gisements Goldex, Lamaque, Lac Herbin et Beaufor.....   | 99  |
| <b>Tableau 4. 2 :</b> Paragénèse des Gisements Goldex, Lamaque, Lac Herbin et Beaufor.....   | 102 |



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS**

TL= tourmaline

Qtz = quartz

ZFLLC= Zone de Faille Larder Lake – Cadillac

ZVS = zone volcanique Sud

QTC= quartz -tourmaline-carbonate

QC = quartz-carbonate

m = mètre

$\mu\text{m}$ = micromètre

Ma= million d'années

Ga= milliard d'année

## RÉSUMÉ

Le champ filonien à quartz-tourmaline-carbonate du district minier de Val-d'Or constitue l'un des archétypes des gisements de type orogénique. Il se situe dans la partie orientale de la zone tectonique de Cadillac-Larder-Lake, Abitibi, Canada. Les filons se sont mis en place dans les structures de deuxième et troisième ordre de la zone tectonique de la Faille Cadillac-Larder Laker. Bien qu'issu d'une suite d'événements communs à tous les filons quartz-tourmaline-carbonate, plusieurs caractéristiques traduisent une hétérogénéité du district. L'assemblage minérale des gisements indique deux groupes de minéralisations, l'une dans la diorite du pluton de Bourlamaque, l'autre dans les intrusions locales dioritiques du sud du district. Les filons dans le pluton de Bourlamaque sont plus riches en dravite avec un  $\delta^{11}\text{B}$  légèrement plus élevées (-11,2 ‰ à -7,7 ‰) que les gisements à l'Ouest. Ces gisements mis en place dans les intrusions locales dioritiques sont plus riches en schorl en zonation autour des dravites, les pyrites et tourmalines contiennent du Pb et Te, et le  $\delta^{11}\text{B}$  est plus léger (-15,6 ‰ à -9,1 ‰). Les cartographies élémentaires de pyrite permettent de reconstituer la paragenèse des gisements. Les pyrites polyphasées indiquent une évolution temporelle en quatre étapes. La première étape est à pyrite aurifère riche en inclusion, traduisant un contexte réducteur. Cette étape serait reliée à un fluide métamorphique profond. La deuxième étape est à sulfates et tourmaline dravite (riche en Mg) amenant un contexte oxydant. Cette étape est reliée à l'interaction des fluides métamorphiques profonds avec un fluide supracrustal oxydé et sulfaté changeant l'état du système. Ce fluide supracrustal pourrait correspondre à de l'eau de mer archéenne évoluée piégée dans les porosités des roches volcaniques infiltrées dans les roches lors d'une phase de déformation régionale. Les deux dernières étapes sont à pyrite non aurifère riche en arsenic et à tourmaline schorl (riche en Fe) avec un retour à un contexte réducteur et tectoniquement plus stable. Le système n'est plus saturé en soufre et est riche en As et Fe. Il n'est pas encore possible de quantifier les périodes de temps entre chaque phase.

MOTS-CLÉS : or orogénique, archéen, tourmaline, pyrite, géochimie, hydrothermalisme, isotope du bore, Val-d'Or.

## INTRODUCTION

L'Archéen tardif ( $\pm 2,7$  Ga à 2,6 Ga) fut une époque d'intense activité metallogénique, produisant de nombreux gisements d'or orogénique dans les ceintures de roches vertes comme celle d'Abitibi, Canada (Groves *et al.*, 1998 ; Robert *et al.* 2005 ; Percival, 2007 ; Goldfarb *et al.*, 2015). Cette sous-province contient une centaine de gisements d'or alignés le long de la zone de faille de Larder Lake-Cadillac (ZFLC) sur 200 km, sous différents types de gisements. De par sa richesse en minéralisation aurifère, l'Abitibi est une zone géologique déjà largement étudiée. De nombreuses synthèses géologiques et metallogéniques sont disponibles (Sauvé *et al.*, 1993 ; Card *et al.*, 1998 ; Gaboury *et al.*, 2001 ; Legault *et al.* 2004 ; Goutier *et al.*, 2010 ; Rafini, 2013 ; Rabeau *et al.*, 2013).

Parmi les nombreux gisements qui y sont discutés, ce mémoire s'intéresse aux gisements d'or orogéniques filoniens du district minier de Val-d'Or, dans la partie orientale de la ZFLC. Ce type de gisement est déjà largement documenté à travers le monde (Groves *et al.*, 1998 ; Kerrich et Ludden, 2000 ; Goldfarb *et al.*, 2005 ; Robert *et al.*, 1994) et le district minier de Val-d'Or en représente l'un des archétypes. La compréhension de ces gites peut donc avoir une application directe sur l'exploration minière. Malgré cette riche documentation, la distinction et la composition des différentes phases hydrothermales minéralisées restent mal contraintes et peu comprises.

Ce mémoire a pour objectif de mieux comprendre le processus de concentration de l'or et le lien génétique entre les différents gisements d'or filoniens dans le district minier de Val-d'Or. Pour cela, une approche minéralogique et géochimique est choisie, notamment sur le couple pyrite-tourmaline, qui est un bon indicateur de la composition de l'environnement de cristallisation (Large *et al.*, 2009 ; Van Hinsberg *et al.*, 2011 ; Zhang *et al.*, 2014).

Le modèle de référence du gisement filonien de Val-d'Or est celui de Robert *et al.* (1989 ; 1994). Il y rassemble les veines de quartz-tourmaline-carbonate (QTC) aurifères du district en un champ filonien étendu sur 30 par 10 km. Robert *et al.* (1989 ; 1994, 2005) suggèrent que ce champ filonien serait issu d'une série d'événement organisé selon une certaine cyclicité; cette hypothèse se base sur leurs caractéristiques hydrothermales et structurales identiques (Sibson *et al.*, 1988 ; Robert *et al.* 1989 ; Robert, 1994; Gaboury *et al.*, 1999 ; Neumayer et Hagemmann, 2000 ; Olivio *et al.*, 2006). Les filons sont mis en place dans les structures de deuxième et troisième ordre de la ZFLLC lors d'une phase de déformation régionale (Robert et Brown, 1986 ; Neumayer et Hagemann, 2002).

Bien que contenant le même assemblage et les mêmes caractéristiques hydrothermales et tectoniques, les différents gisements du champ QTC ne semblent pas homogènes. Il est alors possible de se demander si l'ensemble des gisements qui compose le champ filonien quartz-tourmaline-carbonate ont la même paragenèse.

Cette problématique mène à plusieurs questions :

- L'assemblage minéral est-il homogène d'un gisement à l'autre ?
- Quelle est la relation temporelle entre les phases minéralisées ?
- Quelles sont les relations génétiques entre les phases minéralisées ?

Ce mémoire est effectué sous la supervision de Michel Jébrak, Université du Québec à Montréal, et financé par la chaire en entrepreneuriat minier UQAT-UQAM, le CRSNG et le fond de recherche FRQNT. Ce projet de maîtrise s'inscrit dans le cadre du projet Corridor, qui vise à décrypter l'évolution hydrothermale des couloirs de déformation archéens qui contrôlent les gisements aurifères dans la partie orientale de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi, notamment en datant ses minéralisations avec la méthode Re/Os sur les sulfures et l'or. Dans le cadre du projet Corridor, 91 échantillons ont été récoltés au sein de 45 différentes mines, en activité ou non. La méthodologie tient une place importante dans ce mémoire. Les échantillons ont été traités suivant un même

protocole, adapté et ajusté pour la datation avec la méthode Re/Os et standardisé afin de permettre une reproductibilité du processus. Les minéraux composant les échantillons ont été désolidarisés les uns des autres plutôt que broyés en poudre de roche totale. Parmi le matériel préparé, six échantillons de roches issus du district minier de Val-d'Or ont servi pour ce projet. Ces échantillons sont issus des mines Goldex, Lamaque, Lac Herbin et Beaufor.

La première partie de cette maîtrise a été consacrée à l'inventaire minéralogique des gisements sélectionnés, d'abord à la loupe binoculaire puis au SEM-EDX, au XRF et au XRD. L'inventaire est effectué en fonction de la granulométrie des minéraux. L'inventaire minéralogique a mis en évidence un couple minéral majeur dans les gisements : la pyrite et la tourmaline.

La deuxième partie de cette maîtrise a été consacrée aux analyses géochimiques sur les pyrites et les tourmalines au LA-ICP-MS et à la SIMS. La composition chimique des deux minéraux a été analysée au LA-ICP-MS, sous forme de cartographies élémentaires pour les pyrites et d'analyse d'éléments majeurs, traces et terres rares pour les tourmalines. Les tourmalines et les pyrites enregistrent la composition de leur environnement de croissance et sont donc de bons indicateurs de géochimie du fluide environnant et de son évolution. La composition en isotope du Bore a été mesurée dans les tourmalines. Il s'agit d'une analyse encore peu fréquente en Abitibi et déterminante pour la classification des événements hydrothermaux répertoriés dans le district minier de Val-d'Or.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres qui suivent l'introduction. Le premier chapitre résume le contexte géologique régional du district minier étudié. Le deuxième chapitre décrit la méthodologie développée autour du projet Corridor et les analyses chimiques effectuées sur les échantillons. Le troisième chapitre présente les résultats de l'étude avec l'inventaire minéralogique des gîtes étudiés en fonction de la granulométrie et les résultats d'analyses géochimiques effectuées sur l'assemblage pyrite-tourmaline. Le quatrième chapitre contient l'interprétation des données et la discussion. La conclusion termine ce mémoire. Les annexes

fournissent les résultats d'analyses XRD, d'éléments majeurs, traces et terres rares au LA-ICP-MS sur les tourmalines, d'isotope du bore sur les tourmalines, et les photos des tourmalines pour les deux types d'analyses.

## **CHAPITRE I :**

### **CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL**

## 1.1 La Province du Lac Supérieur

La Province du Lac Supérieur, composée de croûte archéenne, constitue le cœur du Bouclier canadien en Amérique du Nord. Elle est entourée par des provinces géologiques d'âges Paléoproterozoïque excepté à l'est où elle est en contact avec la Province Grenville d'âge Mésoproterozoïque. La partie nord de la Province du Lac Supérieur contient la plus grande proportion de roche à 3,0 Ga jusqu'à 3,7 Ga et les sous-provinces situées au sud exposent des terrains plus jeunes (Williams *et al.*, 1991; Card and Poulsen, 1998).

Plusieurs théories sont suggérées pour la formation de la Province du Lac Supérieur. Les horizontalistes proposent une formation à partir d'assemblage de fragments de protocontinents éoarchéens à mésoarchéens et de croûte océanique néoarchéenne entre 2,72 et 2,68 Ga (Percival, 2012). Cette formation prendrait en compte le développement de cinq orogènes distinctes avec des périodes de magmatisme de subduction. Cependant, la présence de subduction à l'Archéen est encore débattue dans la communauté géologique (Van Hunen et Moyen, 2012). Les verticalistes proposent une théorie alternative. Pour eux, les fragments continentaux seraient dérivés d'un craton hétérogène plus ancien (Supérieur I) par désagrégation partielle en réponse à un changement de la dynamique du manteau (overturn) datant de 2780 Ma (Bédard et Harris, 2014). Pendant ce changement de dynamique, l'écoulement du manteau aurait étiré et désagréé la lithosphère pour former l'agencement concentrique néoarchéenne de la Province du Lac Supérieur, la partie Sud se déchirant en bande de continents séparés par des secteurs océaniques. À 2720 Ma, le bloc nord dévie vers le sud après un changement dans le champ d'écoulement du manteau causé par la traction du manteau sur la lithosphère et l'accrétion des terranes de la partie ouest et sud du carton sur sa bordure principale (Bédard et Harris, 2014).

La formation de la Province du Lac Supérieur est accompagnée et suivie par un plutonisme très étendu et un épaississement crustal (Card and Poulsen, 1998). Ce dernier génère une racine mantellique épaisse et appauvrie en éléments



incompatibles. La Province du Lac Supérieur a subi la majorité de son érosion avant 2,5 Ga et est quasiment stable depuis 2,6 Ga (Percival *et al.*, 2012).

La Province du Lac Supérieur est extrêmement riche en minéralisations. Elle est l'hôte de tout un éventail de type de gîtes distincts allant des gisements d'or de type orogénique, VMS ou porphyrique, de métaux de base aux gîtes de Ni, Cr, Cu, ÉGP et Ti. Les réserves aurifères sont principalement issues de la ceinture de roches vertes abitibiennes et des zones de failles majeurs Larder lake-Cadillac et Porcupine-Destor (Groves *et al.* 1998; Kerrich and Wyman 1990; Kerrich and Ludden 2000).

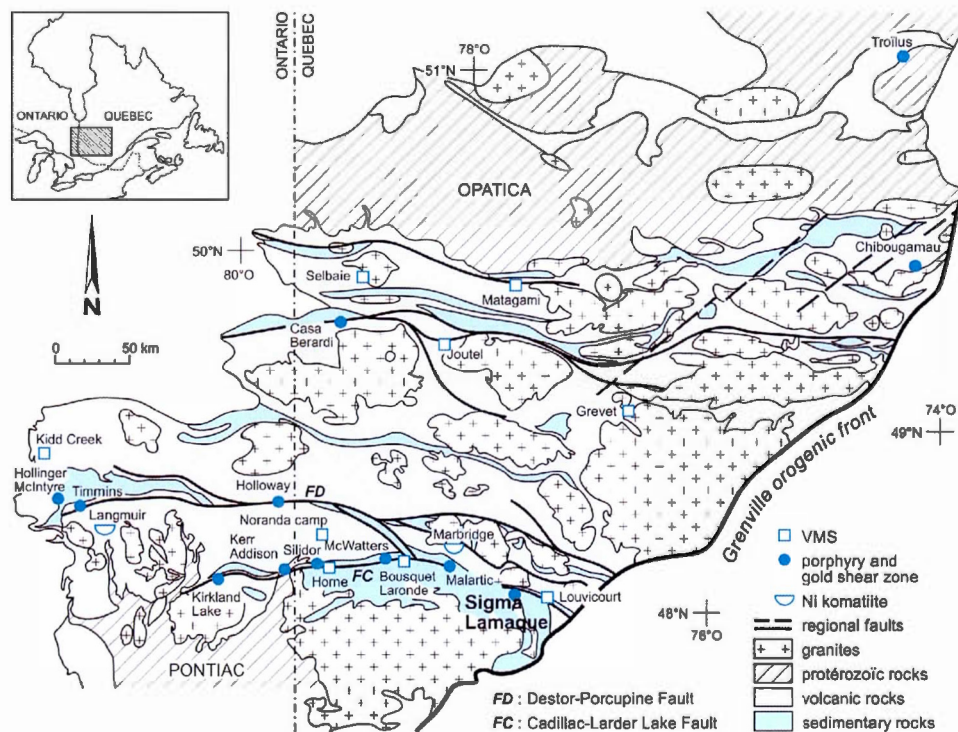
## 1.2 La sous-province de l'Abitibi

L'Abitibi est la sous-province au sud-sud est de la Province du Lac Supérieur (Figure 1. 1). Elle s'étend sur 700 km d'ouest en est, entre le Kapuskasing et la Province de Grenville, et sur 300 km du nord au sud, entre les sous-provinces de l'Opatica et du Pontiac. L'Abitibi est une ceinture de roches vertes dont le faciès métamorphique dominant est schiste vert allant jusqu'amphibolite. L'Abitibi est constituée de domaines plus ou moins rigides séparés par des zones de déformations hétérogènes et anastomosées (Tremblay, 2001). Ces domaines sont composés soit de roches volcaniques, essentiellement ultramafiques, mafiques et felsiques tardi-archéennes, soit de roches métasédimentaires en bandes étroites intercalées entre les roches volcaniques (Davis, 2002).

La corrélation stratigraphique d'un domaine à l'autre peut être sujette à controverse (Sauvé *et al.*, 1991 ; Thurston *et al.*, 2008). Les séquences volcaniques et sédimentaires sont recoupées par des intrusions dioritiques à tonalitiques pré-, syn- et post-tectonique de 2650 à 2759 Ma (Robert *et al.*, 2005; Goutier et Melançon, 2010).

La ceinture est bordée au sud par la Sous-province du Pontiac. Cette limite est tracée par la ZFLLC, qui met les deux sous-provinces en contact. La Sous-province du Pontiac est composée de roches sédimentaires turbiditiques foliées et

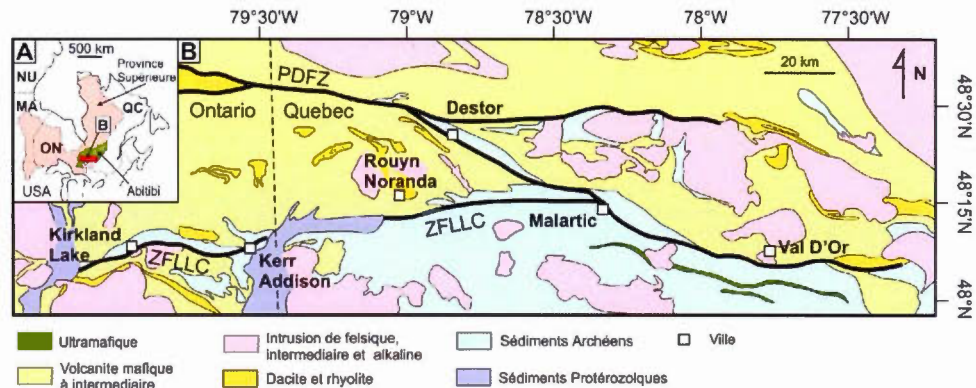
déformées (grès, pélites). Elle contient également quelques horizons de roches volcaniques mafiques à ultramafiques et des intrusions tardi-tectoniques qui se sont mises en place entre 2685 et 2672 Ma (Davis, 2002). À la différence de celles de l'Abitibi, les roches sont métamorphisées au faciès amphibolite. L'orientation et la structure régionale des deux sous-provinces sont dues à la compression nord-sud associée à l'orogénie kénoréenne à la fin de l'Archéen (Jemielita *et al.*, 1900 ; Daigneault *et al.*, 2004)



**Figure 1.1 :** Carte géologique et gîtologique simplifiée de la Sous-province de l'Abitibi, avec les principaux gisements de métaux de base et précieux. Dans le sud se trouvent les failles Porcupine-Destor et Cadillac Larder Lake (Jébrak et Marcoux, 2008).

La ZFLLC est une zone de faille majeure à l'échelle de la croûte de 200 km de long avec une direction est-ouest. Elle montre un pendage fort vers le nord au Québec, pendage qui s'adoucit à 5 km de profondeur, tel qu'interprété en

géophysique (Ludden et Hyrres, 2000)(Figure 1. 2). Une autre zone de faille majeure, la zone de faille Destor-Porcupine, lui est parallèle et s'étend au nord-ouest de la ZFLLC (Figure 1.2).



**Figure 1. 2 :** Carte géologique simplifiée de la zone tectonique de Cadillac, avec les principales mines d'or et de métaux du district. PDFZ=Zone tectonique de Porcupine-Destor et ZFLLC= zone faille de Larder Lake-Cadillac (modifié de Lemarchand, 2012).

L'histoire structurale de la ZFLLC est assez complexe. Daigneault *et al.* (2004) ont proposé une synthèse de son évolution structurale en quatre événements majeurs. Le premier épisode de déformation est l'accrétion des sous-provinces de l'Abitibi et du Pontiac entre 2,69 et 2,68 Ga. Elle est suivie par un jeu décrochant dextre qui forme le bassin de Granada et mène au dépôt de sédiments clastiques du Groupe Timiskaming (2,68 et 2,67 Ga). La reprise du mouvement de chevauchement entre les deux sous-provinces (2670–2661 Ma) est suivie de l'exhumation de la Sous-province du Pontiac (2661–2642 Ma) et d'un dernier épisode de décrochement dextre tardif (< 2642 Ma). La zone de faille Porcupine-Destor est la limite entre la zone volcanique Nord et Sud montrant des âges différents. La zone volcanique Nord est datée entre 2730 et 2705 Ma et la zone volcanique Sud (ZVS) est plus jeune avec des âges entre 2705 et 2700 Ma (Ludden *et al.*, 1986 ; Corfu *et al.* 1989; Daigneault *et al.* 2002).

La métallogénie de l'Abitibi est très variée avec des gisements synvolcaniques et pré- à post-tectoniques (Kerrich et Ludden, 2000 ; Robert *et al.*, 2005). La sous-province a permis l'exploitation de près de 200 mines depuis le début de son exploration. Celles-ci ont produit et produisent essentiellement du cuivre et de l'or, mais également du nickel, zinc, argent, fer, molybdène, étain, bismuth, lithium et amiante. Une synthèse de l'évolution du secteur et de la mise en place des gisements miniers est décrite dans Marcoux et Jébrak (2008). La Sous-province renferme des minerais pré-tectoniques qui incluent : (1) des minéralisations en nickel-cuivre, synvolcaniques, associées aux coulées et sills komatiites, (2) des minéralisations en cuivre-zinc-or exhalatives synvolcaniques (2735 et 2698 Ma) et (3) des minéralisations or et cuivre dans des plutons tonalitiques à faciès porphyrique. Certaines minéralisations plus jeunes, de syn- à post-tectoniques sont plus riches en or avec (1) des minéralisations aurifères dans les veines de quartz qui sont mises en place dans les failles de deuxième à troisième ordre et (2) des minéralisations d'or de type porphyre lié aux intrusions tardives, de calco-alcalines à alcalines, associées aux zones de cisaillement. Le dernier type regroupe (3) des minéralisations de molybdène et de bismuth dans les pegmatites et les filons de quartz dans le batholite de Preissac-Lacorne.

L'essentiel de l'or de l'Abitibi est situé à proximité de la ZFLLC. Les zones de failles Larder Lake-Cadillac et Porcupine-Destor représentent le principal contrôle sur la distribution des gisements (Robert *et al.*, 2005 ; Dubé et Gosselin, 2007 ; Kerrich et Ludden, 2010 ; Rabeau, 2013). Il est généralement admis que ces structures majeures agissent comme un réseau de conduits profonds pour les fluides hydrothermaux (Groves 1993; Goldfarb *et al.* 2005; Beaudoin *et al.* 2006; Bierlein *et al.* 2006) où les minerais peuvent se concentrer facilement. Ces failles contiennent une centaine de gisements aurifères dont 37 avec un contenu supérieur à 10 t Au et une dizaine supérieure à 100t Au (Rafini, 2014) tels que Sigma Lamaque et Canadian Malartic (Robert *et al.* 2005).

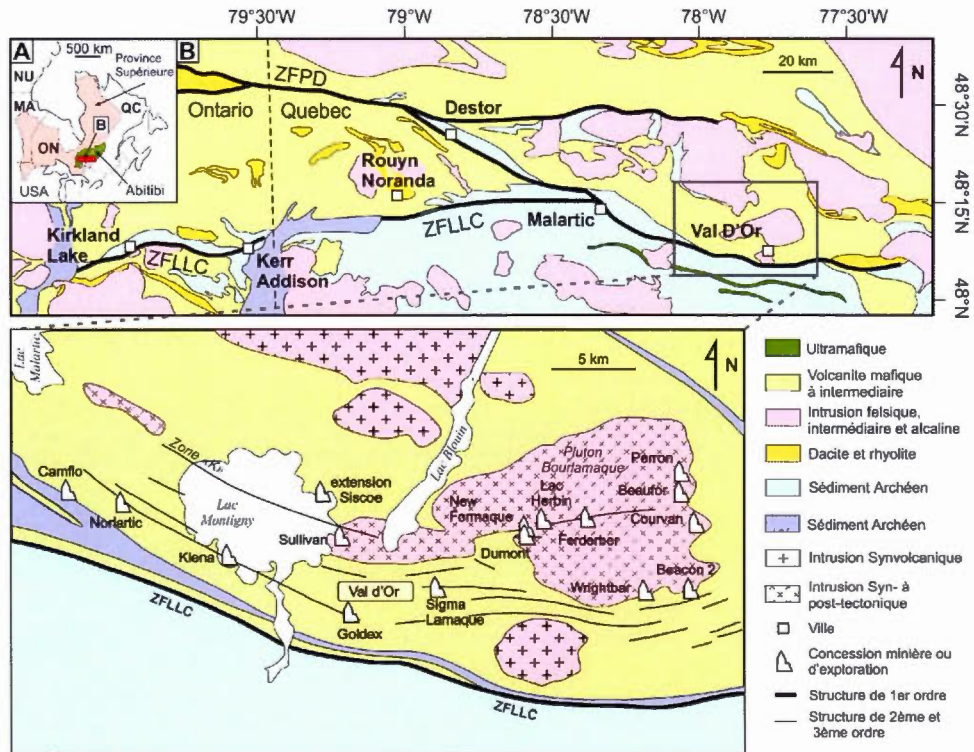
Les minéralisations aurifères mises en place dans le couloir de déformation de la ZFLLC sont d'une grande variété de styles gîtologiques. Ils sont distribués en huit champs gîtologiques en fonction de leurs caractéristiques spatiales, métallogéniques, minéralogiques (assemblage et abondance de sulfure ou non), d'altérations, la nature de l'encaissant, etc. (Rafini, 2014) Les gisements aurifères sont majoritairement de type cisaillement comme autour de Val-d'Or, de type VMS comme autour de Rouyn Noranda ou de type disséminé et en stockwerk comme autour de Malartic. L'hydrothermalisme intense qui s'est distribué le long de la faille à différentes étapes de son évolution géodynamique est à l'origine de ces minéralisations. Le district minier de Val-d'Or s'est construit autour de gîtes d'or filonien dont fait partie la mine Sigma Lamaque.

### **1.3 Géologie du district de Val-d'Or**

#### **1.3.1 Le district minier**

Le district minier de Val-d'Or se trouve dans la portion est de la ZFLLC (Figure 1. 3) qui met en contact les roches métasédimentaires de la Sous-province du Pontiac (wacke, mudrock etc) avec l'assemblage volcano-sédimentaire de l'Abitibi (Jenkins et Brown, 1999). Le district a subi trois phases de déformation (Robert, 1994; Robert et Poulsen, 2001). La première phase de déformation D1 impacte majoritairement la partie ouest en la plissant. La deuxième phase de déformation D2 est à l'origine de la foliation dominante est-ouest, pendant une collision oblique, provoquant un raccourcissement et la formation d'une série de failles transformantes subverticales est-ouest. D2 se termine avec le début de déformation dextre transitionnelle D3 le long de la ZFLLC (Robert, 1994; Robert et Poulsen, 2001).





**Figure 1. 3 :** Carte géologique simplifiée du district minier de Val d'Or-Malartic. ZFLLC= zone de faille de Larder Lake- Cadillac (modifié de Lemarchand, 2012).

La région de Malartic-Val d'Or contient des roches ultramafiques à felsiques mises en place entre 2714 Ma et 2702 Ma (Pilote et al. 1998; Scott et al. 2002). L'évolution et la mise en place de la séquence des roches volcano-sédimentaires de la région de Malartic-Val d'Or est complexe. Deux modèles majeurs s'opposent : le modèle accréctionnaire et le modèle stratigraphique. Le modèle accréctionnaire de Desrochers et Hubert (1996) suggère que les roches ultramafiques et mafiques ont formé plusieurs terranes qui s'acréterent dans le groupe composite de Malartic durant la première phase de déformation D1. Durant cette période, les roches de calco-alcalines de la Formation de Val d'Or se déposèrent en discordance angulaire. Le modèle stratigraphique de Scott et al. (2002) suggère un contact graduel entre la Formation de Val d'Or et Jacola. Ce modèle divise le district en deux groupes sur des critères de tectonique régionale

et de stratigraphie volcano-sédimentaire. Le Groupe de Malartic est composé des Formations de La Motte-Vassan, de Dubuisson et de Jacola ; le Groupe de Louvicourt est composé des Formations de Val-d'Or et d'Héva.

Le Groupe de Malartic est caractérisé par des komatiites, des basaltes et des dykes et sills. Scott et al. (2002) l'interprètent comme un plancher océanique archéen lié à l'activité de panaches mantelliques. Scott *et al.* (2002) définissent la succession avec au sommet la Formation d'Héva en contact stratigraphique concordant avec la Formation Val-d'Or qui est en contact stratigraphique graduel avec la Formation Jacola. Ces trois formations regroupées sont interprétées comme le résultat d'un cycle d'arc volcanique dont la stratigraphie englobe le cycle géodynamique complet entre 2714 et 2702 Ma  $\pm$  2 Ma. Le Groupe de Malartic correspondrait à un plateau sous-marin et le Groupe de Louvicourt correspondant à une zone de subduction et de dorsale (Scott *et al.*, 2002).

Le Groupe de Louvicourt contient la Formation de Val D'Or. Cette Formation volcanique d'affinité tholéitique contient une suite mafique à felsique et des roches volcanoclastiques qui sont recoupés par des intrusions de porphyres feldspathiques, syn- à post-tectoniques ( 2694 Ma  $\pm$  2 Ma) ( Wong *et al.*, 1991). La Formation de Dubuisson contient des roches volcaniques ultramafiques, des roches volcaniques felsiques et de nombreuses roches volcanoclastites et intrusions porphyriques felsiques synvolcaniques. Au centre du district minier se trouve une intrusion dioritique synvolcanique calco-alkaline couvrant une superficie de 170 km<sup>2</sup>, le pluton de Bourlamaque. Il recoupe les trois formations susnommées, majoritairement de la Formation de Val d'Or. Le métamorphisme est au faciès schiste vert et passe localement au faciès amphibolites en profondeur.

Le district contient de nombreux cisaillements orientés est-ouest et subparallèles au grain structural de la région que Robert (1994) divise en trois ordres. Le premier ordre représente la ZFLC. Le deuxième ordre regroupe des zones placées autour de la faille majeure de 1 à 10 km de long et de 10 à 100 m de large

avec un pendage fort à subvertical, et un décrochement orienté sud-est dans la partie ouest, et est-ouest dans la partie est du district. Le troisième ordre regroupe le plus grand nombre de failles. Elles sont de plus petites envergures, épaisses de quelques mètres et longues de 1 km, et décrochantes entre le nord-ouest et le nord-est avec un pendage entre 35° et 75° vers le sud ou le nord. Les minéralisations se mettent en place dans les structures du deuxième et troisième ordre. Robert (1994) propose que ces structures aient représenté, à un moment dans l'évolution structurale du district, un réseau interconnecté de grande envergure disponible pour la circulation des fluides hydrothermaux.

Deux grands types de gisements sont présents dans la zone Val d'Or-Malartic : les sulfures volcanogènes et les cisaillements à or. Le deuxième type se divise entre les « corridors » à or disséminés et les filons quartz-carbonate,  $\pm$  or,  $\pm$  tourmaline. Les corridors et les veines se mettent en place de manière non homogène au sein de leurs encaissants, dans des zones de cisaillement subverticales. Il s'agit du type le plus abondant dans le district de Val-d'Or et a produit 60% de l'or (Robert, 1994). Le champ filonien aurifère de Val-d'Or est un archétype classique des dépôts aurifères mésothermaux. Il forme un district aurifère comprenant plus d'une vingtaine de gisements exploités sur une surface de 30 km par 10 km. Robert (1994) définit un champ filonien comme un groupe de filons ayant les mêmes caractéristiques hydrothermales (assemblage minéralogique de la veine et altération hydrothermale) et structurales. Dans ce district, les filons sont classés en deux familles ; ils marqueraient deux événements hydrothermaux distincts (Robert et Brown, 1986; Couture, 1994). La première famille regroupe les filons à quartz-carbonate précoces qui sont généralement déformés, reliés à un événement pré-métamorphique et recoupés par des dykes mafiques régionaux. La seconde famille est constituée des filons quartz-tourmaline-carbonate (QTC) tardifs, post métamorphique, recoupant toutes les intrusions et les dykes mafiques archéens de la région, excepté les diabases protérozoïques (Latulippe, 1966). Les deux champs partagent une origine commune dans les systèmes de premier ordre (Robert, 1990 ; Neumayer et Hagemann, 2002 ; Beaudoin et Pitre, 2005) et se découpent



dans les failles de deuxièmes et troisièmes ordres. Les deux champs filoniens sont séparés dans le temps par une série d'intrusions (Robert, 1990).

Chaque famille est caractérisée par une minéralogie semblable et homogène, dont les phases se présentent en proportion différente. L'assemblage principal est composé de quartz, carbonate, tourmaline, pyrite, pyrrhotite, chalcoppyrite et scheelite. Les filons sont majoritairement subverticaux. Ils occupent des domaines ductile-cassants comme des failles inverses, des structures cisailantes peu pentées et des fentes de tension subhorizontales (Robert et Brown, 1986; Gaboury *et al.*, 2001). Les filons peuvent être accompagnés de plusieurs types d'altération hydrothermale: (1) formant une auréole jusqu'à 3 m autour du filon et se compose d'épidote, biotite et chlorite, carbonate et séricite, ou (2) formant une zone de 1 à 5 cm autour du filon, détruisant la chlorite et la biotite et les remplaçant par de l'albite, carbonate et séricite, d'origine hydrothermale (Robert, 1989). Les filons QTC seront décrits plus en détails dans ce mémoire.

### 1.3.2 Le pluton de Bourlamaque

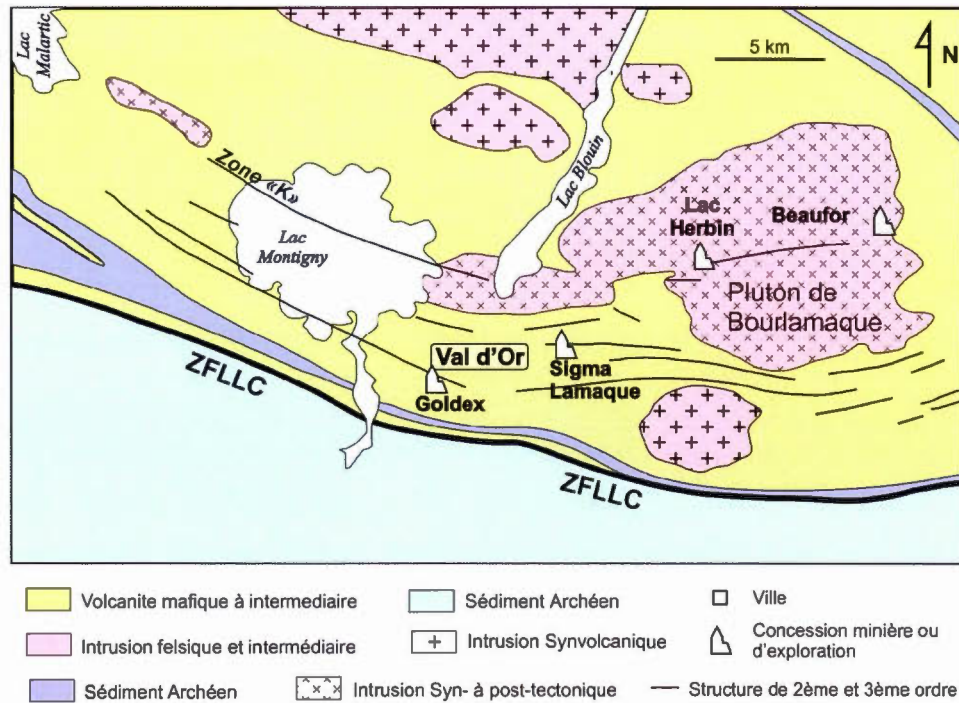
Le pluton de Bourlamaque est un intrusif d'une superficie d'environ 170 km<sup>2</sup> au nord-est de la ville de Val d'Or. Sa composition varie de diorite à diorite quartzifère. Il ne présente pas d'auréole de métamorphisme évidente, mais des fractures et des failles sur ses bordures. Il est mis en place dans le bloc de Malartic et recoupe les Formations de Val d'Or, Jacola et Dubuisson. Wong *et al.* (1991) l'ont daté à 2699.8 Ma  $\pm$  1Ma. Le pluton est interprété comme étant synvolcanique et cogénétique de la Formation de Val-d'Or qu'il recoupe (Taner et Trudel, 1989; Jébrak *et al.* 1991). Tout comme les roches encaissantes, le pluton de Bourlamaque se trouve dans le faciès schiste vert. Jébrak *et al.* (1991) démontrent à l'aide d'une étude gravimétrique que le pluton serait de faible épaisseur (1 km d'épaisseur en moyenne) et subhorizontal. Il contient une dizaine de gisements filoniens aurifères post-métamorphiques sous forme de filons de

QTC-sulfure qui sont associées à des zones de cisaillement inverses. Ils sont riches en sulfure (jusqu'à 25 %) avec de la pyrite et chalcopyrite en majorité et plus rarement de la pyrrhotite. La pyrite est porteuse d'or. Ils montrent un système cassant de veines rubanées (semi) massives subverticales injectées dans les failles et associées à des veines peu pentées très massives (Robert, 1994; Rafini, 2014). Il n'y a pas de relation pétrogénétiques entre le pluton et les filons, les filons étant au moins 15 Ma plus jeunes que le pluton (Robert, 1990). Robert (1990) propose que le positionnement des filons QTC dans le pluton de Bourlamaque est soit une coïncidence, soit la marque du schéma d'écoulement des fluides hydrothermaux à travers l'intrusion. Jébrak *et al.* (1991) propose que les fluides hydrothermaux ont été piégés dans le pluton et sont remontés à travers les fractures qui le traversent et y concentrent les minéralisations.

### 1.3.3 Les mines étudiés

Quatre mines ont été choisies dans le cadre de cette étude : d'ouest en est, ce sont les mines Goldex, Lamaque, Lac Herbin et Beaufor (Figure 1. 4). Toutes ces mines exploitent des gîtes d'or orogéniques de type filonien dans des encaissants volcano-plutoniques. Les mines sont distribuées le long d'une ligne sud ouest-nord est de 30 km traversant le pluton Bourlamaque. Ces mines sont séparées le Groupe de Pontiac au sud par la ZFLLC.

Ces quatre gisements filoniens sont sélectionnés parmi la vingtaine exploitée dans le champ filonien. Elles sont distribuées à travers le champ ce qui permet d'avoir une vue d'ensemble des gisements. Deux des gisements, Lac Herbin et Beaufor, sont encaissés dans le pluton de Bourlamaque, et les deux autres, Goldex et Lamaque, sont mis en place dans les intrusion diorites plus petite. Ceci permet de d'étudier la possible influence de l'encaissant sur les filons.



**Figure 1. 4 :** Carte géologique simplifiée du district minier de Val d'Or, avec la localisation des mines ciblées (modifiée de Lemarchand, 2010).

#### 1.3.3.1 Goldex

La mine Goldex est localisée dans la zone volcanique Sud (ZVS), à 1,5 km au nord de la ZFLLC. Le gisement est mis en place dans un intrusif de diorite quartzique en sill de 90 à 250 m de large et 3,8 km de long (Rafini, 2014 ; Genest *et al.*, 2012). La diorite quartzique plonge abruptement en direction nord-est dans la Formation Jacola comme la séquence de roches volcaniques intermédiaires mafiques et ultramafiques sous-jacente. Ce gisement est exploité en mine souterraine par Agnico Eagle depuis l'automne 2008. La mine a produit à ce jour 101,54 t d'or et ses réserves prouvées et probables sont de 21,7 tonnes d'or pour

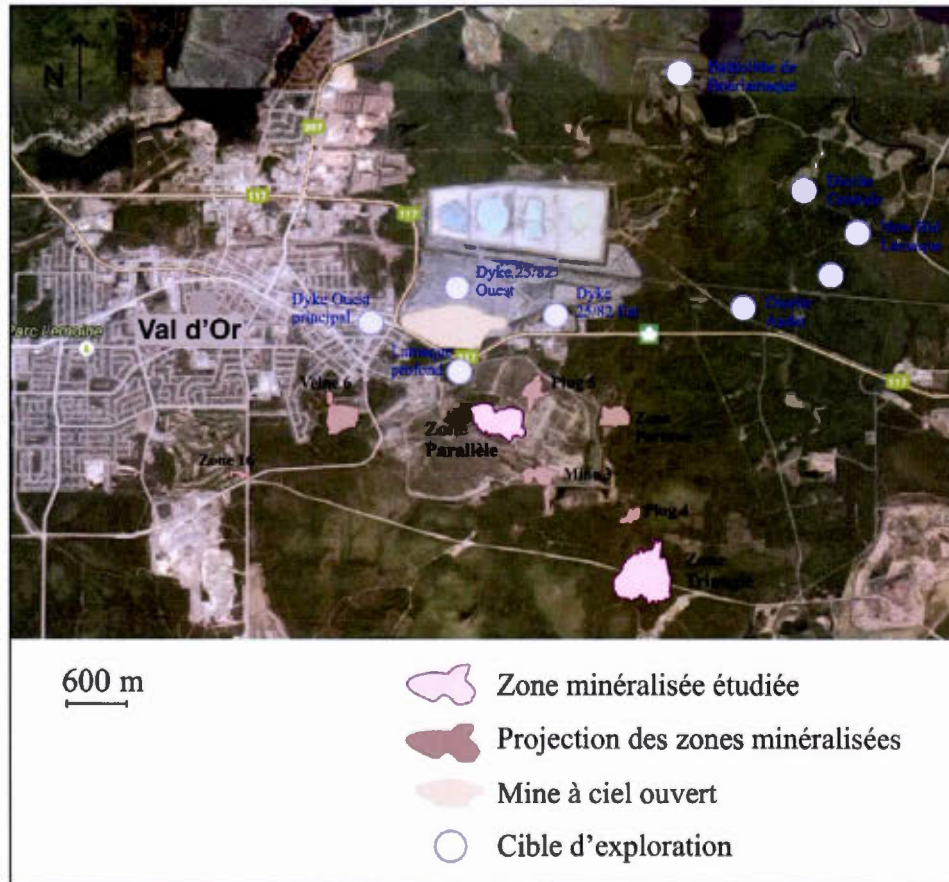
12,9 millions de tonnes titrant à 1,61 g/t d'or (Réserves et ressources de Goldex, 31 décembre 2015).

La minéralisation est formée par des veines et veinules de quartz-tourmaline avec un fort contrôle structural. La ZFLLC traverse la limite sud de la propriété. L'intrusion est parallèle à la foliation régionale. L'intrusion est associée à une faille de troisième ordre parallèle à la ZFLLC et a une attitude de N100-125° et un pendage qui varie de 60 à 75° (Rafini, 2014). Les veines et veinules à QTC minéralisées sont zonées avec une altération proximale à albite et séricite (0,5 m en moyenne) et une altération plus distale en biotite et chlorite (Rafini, 2014). À la différence de l'intrusion, les veines sont orientées à N90° avec un pendage de 30°, proche de la mylonite, mais perpendiculaire à son grain. Une petite partie de la minéralisation se trouve parallèle au grain structural, avec une attitude de N280° et un pendage de 60 à 75°. Selon Rafini (2014), il pourrait s'agir d'un système conjugué. Le gisement se situe au faciès schiste vert inférieur.

#### 1.3.3.2 Lamaque

La mine Lamaque est située au sud du pluton de Bourlamaque (Figure 1. 4). Le gisement s'est mis en place dans une diorite qui recoupe la Formation Val-d'Or. Il est relié à un système de faille de troisième ordre de la ZFLLC. La mine Lamaque a produit plus de 140 tonnes d'or et le gisement recèle encore d'autres zones minéralisées. Parmi les plus prometteuses, la zone Triangle et la zone Parallèle séparées de 2 km, la première au sud-est de la seconde (Figure 1. 5). La zone Triangle est évaluée à 19,50 tonnes d'or indiqué et 27,10 tonnes d'or estimé (Poirier *et al.*, 2015). La zone Parallèle est évaluée à 4,44 tonnes d'or indiqué et 2,30 tonnes d'or estimé (Poirier *et al.*, 2015). Ces deux propriétés appartiennent à Integra gold qui y effectue des activités d'exploration. Situé au nord de la mine Lamaque, la mine Sigma a produit 140 tonnes d'or. À elles deux, ces mines représentent le plus grand gisement lié à une zone de cisaillement à filon QTC des

gisements aurifères du district de Val d'or. (Poulsen et al, 2000 ; Daigneault *et al.*, 2002).



**Figure 1. 5 :** Carte de la mine Lamaque distinguant les zones Triangle et Parallèle. Les cibles d’explorations sont des sites non exploités mais étudiés pour en déterminer l’intérêt (Poirier *et al.*, 2015).

Dans les deux zones, la minéralisation se trouve dans un système de veines et veinules de quartz-tourmaline. Celui-ci est syn-cisaillement, parallèle aux failles ductiles et au grain mylonitique (Rafini, 2014). L’empreinte de la zone minéralisée s’étend sur une surface de 2 km par 1,5 km. Actuellement, la minéralisation de la zone Triangle se poursuit jusqu’au moins 600 mètres de profondeur. Les veines sont situées dans des zones altérées et fracturées d’une

intrusion tonalitique à dioritique (800 m par 400 m) (Poulsen *et al.*, 2000), à pendage fort. La zone Parallèle contient des teneurs supérieures et s'étend jusqu'à 400 mètres de profondeur.

Les veines ont une épaisseur variable de 15 cm à 6 m, certaines sont boudinées, subverticales et d'autres en échelon à pendage modéré. Elles sont encaissées dans une zone de cisaillement étroite qui recoupe toutes les lithologies. Le gisement de Lamaque est recoupé par des dykes de porphyre feldspathique de direction est-ouest avec un pendage fort vers le sud. Le gisement se situe au faciès schiste vert supérieur et atteint le faciès schiste vert inférieur à 1 km de profondeur (Robert *et al.*, 1986). La minéralisation est post-métamorphique et syn-cisaillement.

#### 1.3.3.3 Lac Herbin

La mine Lac Herbin est située dans le pluton Bourlamaque (Figure 1.4). L'intrusif évolue d'une composition dioritique, tonalitique à granodioritique. À l'ouest, il est en contact avec les andésites de la Formation de Jacola. Depuis 2003, la mine est détenue par QMX corp. qui a continué à l'exploiter jusqu'à sa fermeture en mars 2015. La mine Lac Herbin aura produit 1 029 600 tonnes de minerais avec une teneur moyenne de 4,76 g/t pour un total de 5 tonnes d'or (Hitchins *et al.*, 2011).

La minéralisation se trouve dans des veines de QTC plus ou moins massives (centimétrique à métrique). Elles se sont mises en place dans des failles de deuxième à troisième ordre orientées est-ouest et aux intersections de celles-ci (Lemarchand, 2010; Rafini, 2014). Les veines minéralisées sont majoritairement parallèles au grain mylonitique, mais peuvent être dans de rares cas des veines de tension. De nombreux dykes dioritiques métriques traversent le gîte dans le même axe que les failles et les veines. Ils sont souvent déformés et altérés. Au sud du gîte se trouve une faille principale. Elle contient de volumineuses brèches hydrauliques minéralisées (Rafini, 2014). Le gisement se trouve dans le faciès schiste vert inférieur et est post métamorphique (Lemarchand, 2010).



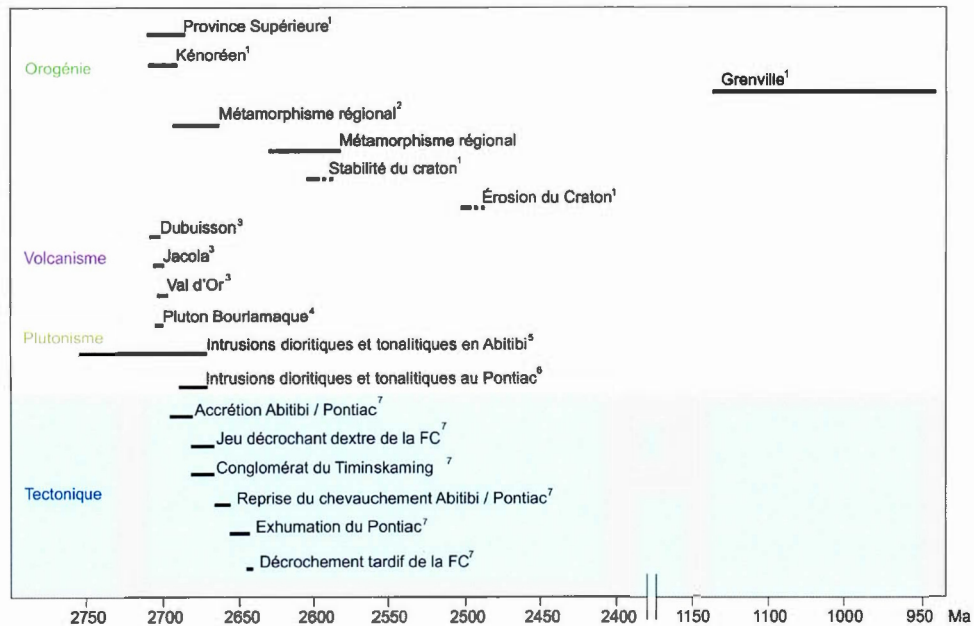
#### 1.3.3.4 Beaufor

La mine Beaufor est située dans l'Est du pluton de Bourlamaque (Figure 1. 4). Le gisement est mis en place proche du contact du pluton avec son encaissant composé localement de basalte et de roche ultramafique de la Formation de Dubuisson. Le système de veines est associé à un système de deuxième et troisième ordre parallèles à la ZFLLC. La mine appartient à Mines Richmond depuis 2001. Cette mine souterraine a produit plus de 15,5 tonnes d'or depuis 1996. Le total des ressources mesurées et indiquées est de 843 000 tonnes, d'une teneur de 6,34 g/t d'or, pour 5 tonnes d'or (décembre 2015).

La minéralisation se situe dans des veines de quartz massives de puissance métrique, dans les zones de fracturation et de cisaillement. Les failles sont orientées N090° avec un pendage de 65 °. La minéralisation se situe dans les zones de cisaillement et des veines de tension subhorizontales (Chabot *et al.*, 2007). La zone minéralisée est confinée dans une zone fortement fracturée délimitée par deux failles est-ouest, la faille Perron plongeant à 80 ° vers le nord et la faille Sud plongeant à 60-70° vers le sud (Tessier, 1990). La granodiorite est recoupée par des dykes mafiques. Les dykes semblent avoir joué un rôle rhéologique sur la mise en place des veines minéralisées (Tessier, 1990). Le gisement est mis en place dans le faciès schiste vert inférieur. Sa mise en place est contemporaine à la déformation et post-métamorphisme (Chabot *et al.*, 2007).

### 1.4 Synthèse chronologique

Une synthèse chronologique des événements tectoniques, stratigraphiques et métamorphiques ayant touché la Province du Supérieur et ses sous-provinces sont décrites ci-dessous.



**Figure 1. 6 :** Compilation des données géochronologiques de la région de la Province du Supérieur. 1 : Percival, 2007 ; 2 : Feng et al., 1992 ; Powel et al., 1995 ; 3 : Pilote et al., 2000 ; 4 : Wong et al., 1991 ; 5 : Goutier et Malencon, 2010 ; 6 : Davis, 2002 ; 7 : Daigneault et Mueller, 2004.

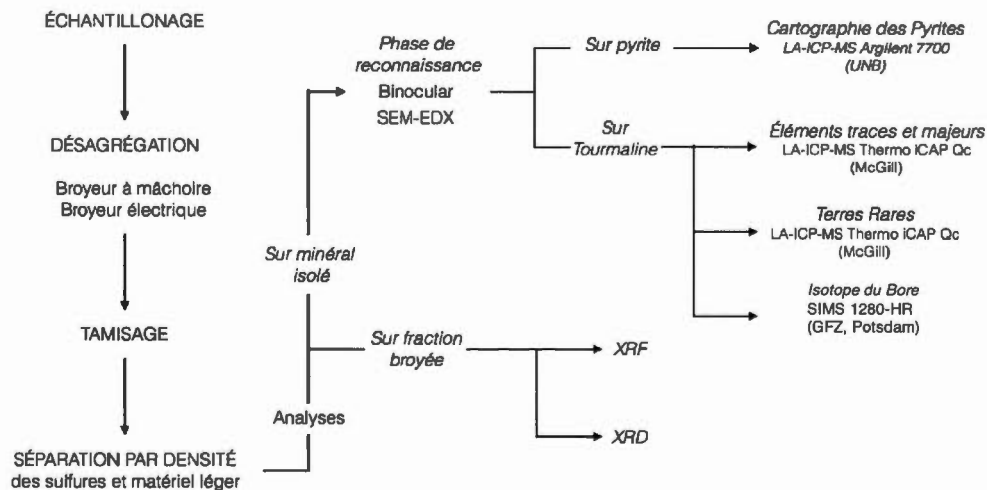


## **CHAPITRE II :**

### **MÉTHODOLOGIE**

Les échantillons sont tous traités suivant une procédure normalisée (Figure 2.1). Les minéraux des échantillons sont inventoriés puis séparés en fonction de leur taille et de leur densité (or, sulfure vs. quartz tourmaline, etc). La séparation par densité est effectuée à partir de la méthodologie de Norbert Clauer sur les argiles (Clauer et Chaudhuri, 1995).

La méthodologie se découpe en cinq étapes principales : l'échantillonnage, la désagrégation, le tamisage, la séparation par densité et les analyses. Les protocoles sont disponibles dans l'annexe A.



**Figure 2. 1 :** Méthodologie utilisée au cours cette étude.

## 2.1 Échantillonnage

L'échantillonnage a été effectué pendant l'été 2014 par une équipe d'étudiants de l'UQAM : Nicolas Mériaault, Sacha Lafrance, étudiants à la maîtrise, et Jacynthe Bleau, étudiante au baccalauréat. 91 échantillons issus de 41 mines ont été collectés pour le projet Corridor. Les échantillons sont tous issus des carothèques des compagnies et représentatifs des zones minéralisées. Les échantillons contiennent tous un assemblage de pyrite et quartz-tourmaline-carbonate en

quantité. D'une carotte à l'autre, la concentration en sulfure et or, libre ou disséminée, est variable. Le projet Corridor se sert de la pyrite pour obtenir des âges avec la méthode Re/Os.

Parmi les 91 échantillons, seul six échantillons sont retenus pour cette étude issu de quatre mines : un échantillon venant de la mine souterraine de Goldex, trois échantillons venant du gisement Lamaque (un de la zone Parallèle et deux de la zone Triangle), un échantillon venant du gisement Lac Herbin et un échantillon venant du gisement de Beaufor.

## **2.2 Désagrégation**

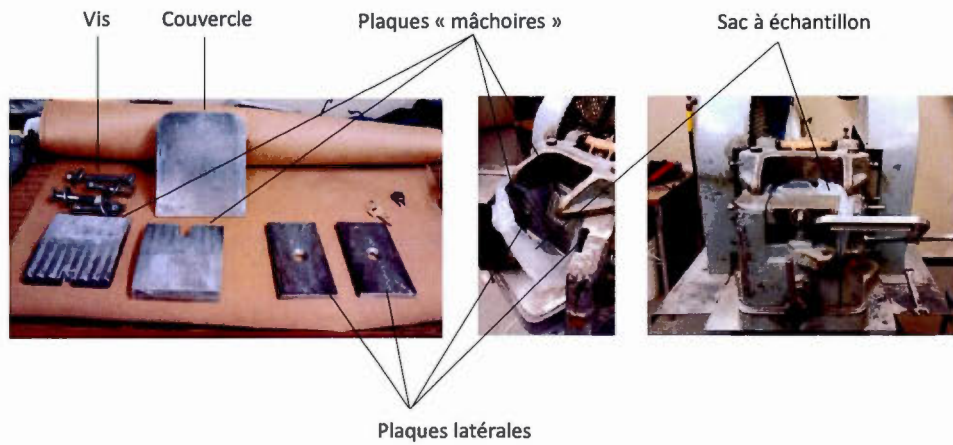
La singularité de cette étude tient dans la méthode de préparation des échantillons. En effet, ils ne sont pas étudiés en tant que roche totale, mais à l'échelle du minéral. L'échantillon est broyé de manière à séparer les minéraux les uns des autres sans les briser. Pour ce faire, deux différents types de broyeurs sont utilisés. Le premier est un broyeur à mâchoires qui permet de réduire l'échantillon en grains autour de 8 mm de diamètre. Le second est un broyeur électrique Retch RM200 qui désassemble les minéraux les uns des autres.

### **2.2.1 Le broyeur à mâchoires**

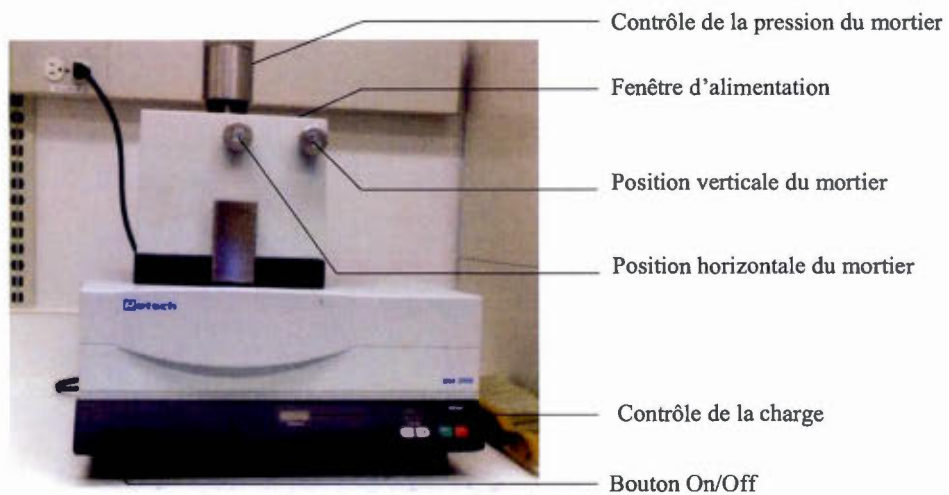
Le rôle de ce broyeur est de réduire les carottes en grains assez fins pour être utilisés par le second (Figure 2.2). Le protocole d'utilisation et de nettoyage pour éviter toute contamination se trouve dans l'annexe A.

### **2.2.2 Le broyeur électrique**

Le broyeur électrique utilisé est un Retch RM200 (Figure 2.3). Il permet de séparer les minéraux les uns des autres. Le protocole d'utilisation et de nettoyage pour éviter toute contamination se trouve dans l'annexe A.



**Figure 2. 2 :** Montage et mécanisme formant le broyeur à mâchoire.



**Figure 2. 3 :** Mécanisme du mortier électrique RM200

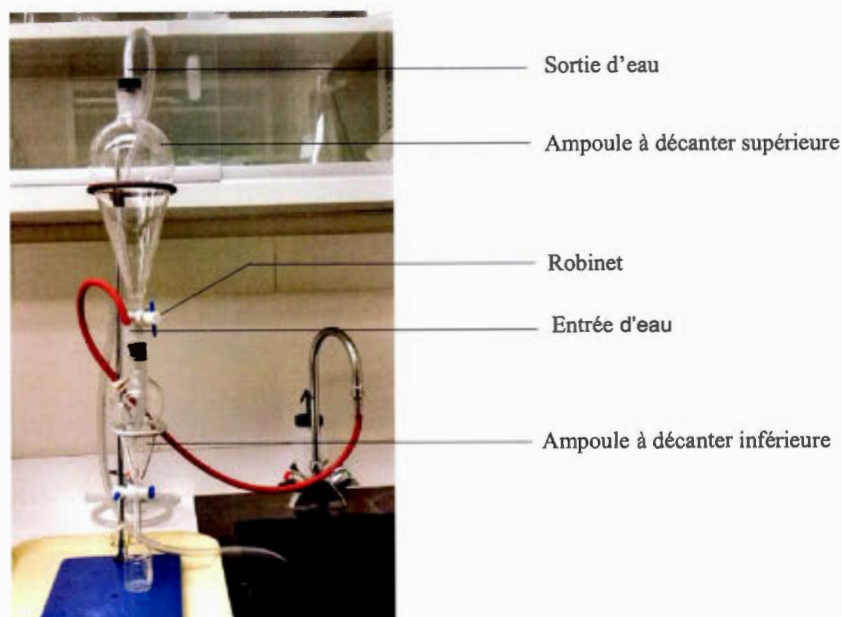
### 2.3 Le tamisage

Les échantillons séparés en minéraux isolés sont triés en fonction de leur taille. Avant de commencer, une petite partie du matériel est réservée pour faire des analyses de roche totale. Ce qui reste est tamisé avec des tamis standard USA et divisé en huit fractions granulométriques :  $> 1000 \mu\text{m}$ ; de  $500 \mu\text{m}$  à  $1000 \mu\text{m}$ ; de  $250 \mu\text{m}$  à  $500 \mu\text{m}$ ; de  $100 \mu\text{m}$  à  $250 \mu\text{m}$ ; de  $60 \mu\text{m}$  à  $100 \mu\text{m}$ ; de  $40 \mu\text{m}$  à  $60 \mu\text{m}$ ;  $40 \mu\text{m}$  et  $2 \mu\text{m}$ . Le tamisage est réalisé avec du matériel sec et 15 ml de matériel de chaque granulométrie est conservé pour des analyses XRD et XRF ultérieures. Ce qui reste est immergé et placé dans un bain à ultrasons modèle Branson 1200 pour séparer les derniers grains fixés ensemble. La granulométrie  $< 2 \mu\text{m}$  se trouve en suspension dans la fraction  $< 40 \mu\text{m}$  après 2 heures de décantation dans un bêcher de 500 ml.

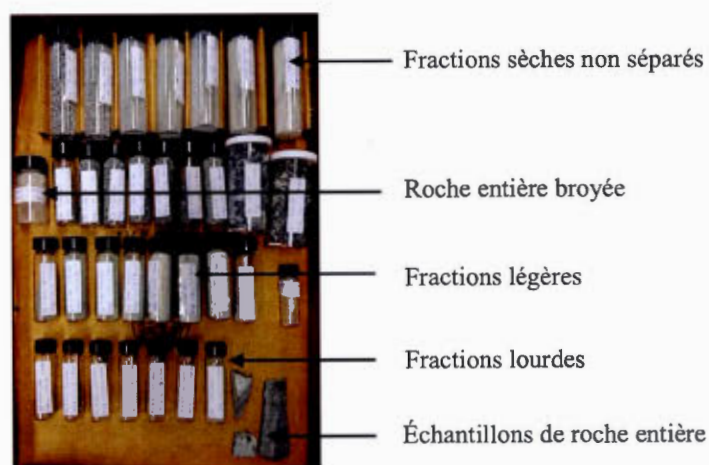
### 2.4 La séparation par densité

La séparation des éléments lourds et légers est effectuée en utilisant leur densité. La méthode de densité est adaptée par Christian Sasseville de celle de Norbert Clauer pour les argiles (Clauer et Chaudhuri, 1995). Le système est constitué d'un assemblage de deux ampoules à décanter disposées l'une sur l'autre : l'une de 1000 ml et l'autre de 250 ml (Figure 2.4).

L'eau rentre dans le système par l'ampoule inférieure, elle-même remplie d'eau, et remonte vers l'ampoule supérieure. L'échantillon est placé dans l'ampoule à décanter supérieure puis tombe vers l'inférieure. Le système utilise la pression de l'eau comme trieuse : en gérant la pression de l'eau entrant, il est possible de gérer le degré de différenciation du matériel. Lorsque la séparation est terminée, le matériel lourd est récupéré au fond de l'ampoule à décanter inférieure et la plus légère dans la partie supérieure. Une fois extraits, les matériaux lourds et légers sont séchés sous une hotte pendant 24 à 72 heures, puis mis en aliquote et étiquetés avec des tags RFID (Figure 2.5).



**Figure 2. 4 :** Montage permettant la séparation par densité des sulfures inspirée du travail de Norbert Clauer pour les argiles.



**Figure 2. 5 :** Fractions rangées par granulométrie, sèche et séparées par densité (léger et lourd).

## **2.5 Les analyses**

### **2.5.1 Lames minces**

Des lames minces de tous les échantillons sont fabriqués. L'analyse de ces lames minces permet d'identifier les minéraux composant l'échantillon et faire une paragenèse. C'est l'analyse des lames minces qui permet de sélectionner les échantillons qui vont être broyés et séparés pour analyse.

### **2.5.2 Minéraux isolés**

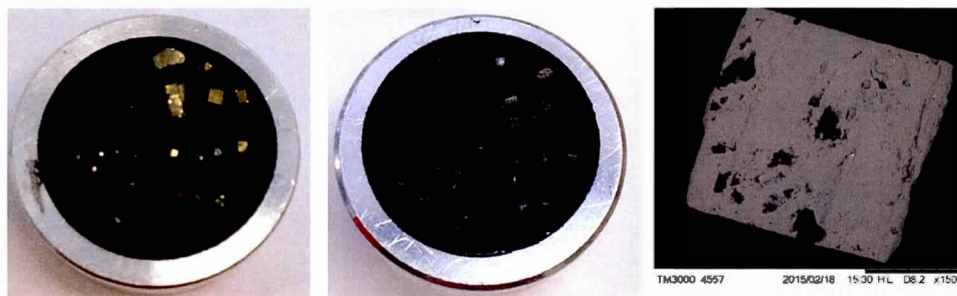
#### **2.5.2.1 Loupe binoculaire**

Chaque granulométrie est individuellement étudiée sous une loupe binoculaire. Cette étape permet d'identifier et de différencier les minéraux afin d'avoir un premier regard sur la minéralogie présente. Cela sert également à estimer la proportion de chaque type de minéraux par granulométrie. Les plus intéressants sont sélectionnés et rassemblés sur un support afin d'être analysés au SEM-EDX (microscope électronique à balayage).

#### **2.5.2.2 SEM-EDX**

Les minéraux sélectionnés sont analysés avec un microscope électronique à balayage Hitachi TM3000 (MEB) couplé avec un spectromètre d'analyse dispersive en énergie Bruker Quantax 70 (EDX). Cette technique de microscopie électronique produit des images de haute résolution de la surface de l'échantillon en utilisant le principe d'interaction électrons-matière. L'image apparaît en dégradé de gris avec une augmentation de la densité du matériel en allant du noir au blanc. L'analyse est effectuée dans des conditions VP-SEM (pression variable), avec une aspiration de 25 Vk et un courant de probabilité de 70. Cette technique permet d'identifier les minéraux par leur composition élémentaire.

Pour chaque échantillon, trois montages sont préparés : un de minéraux issus de la fraction lourde, un des minéraux légers et un dernier avec les minéraux légers tombés dans la fraction lourde (Figure 2.6). Ces derniers contiennent souvent du matériel très dense comme l'or ou des alliages à or qui expliquent leur densité.



**Figure 2. 6 :** Supports utilisés pour les analyses des minéraux au SEM-EDX. Les minéraux sont fixés sur un collant en carbone et rangés par granulométrie. Le support de gauche correspond aux pyrites de Lamaque et le support de droite aux tourmalines de Lac Herbin. La dernière image est une photo prise par le SEM d'une pyrite.

#### 2.5.2.3 LA-ICP-MS

La technique LA-ICP-MS consiste en une ablation laser (LA) et une spectroscopie de masse avec un plasma couplée par induction (ICP-MS) (Figure 2.7). Elle permet d'analyser la majorité des éléments chimiques du tableau périodique, avec une concentration minimale de 1-10 ppb. La technique LA-ICP-MS se fait en plusieurs étapes. La première est l'ablation laser (LA). L'échantillon solide est placé dans la cellule sous vide du laser. Celui-ci va en arracher un morceau qui est réduit sous forme d'aérosol de fines particules ( $<2 \mu\text{m}$ ) et est transporté vers la partie ICP avec du gaz d'hélium. Dans l'ICP, le gaz (argon combiné à l'hélium) est chauffé électriquement à une température assez haute pour former un plasma ( $\pm 6000 \text{ }^\circ\text{K}$ ). Le plasma est un fluide similaire à un gaz contenant de nombreux électrons libres et d'ions. L'aérosol est transporté dans ce plasma où il est vaporisé puis ionisé.





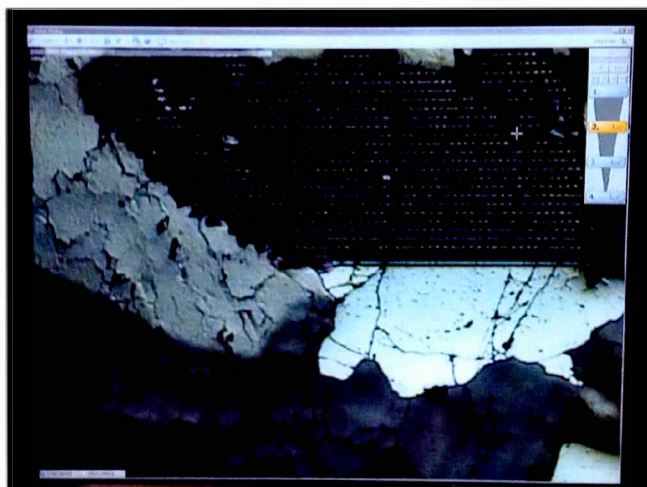
**Figure 2. 7 :** LA-ICP-MS de UNB (a) est la partie laser dans lequel les minéraux sont placés et (b) le spectromètre de masse.

Dans la partie spectromètre de masse (MS), les ions formés sont séparés suivant leur rapport masse/charge. L'intensité du faisceau d'ions est convertie en un signal électrique qui est enregistré et mesuré. Le rapport masse/charge permet d'identifier la composition élémentaire et l'intensité la concentration de l'élément. Le résultat est transmis sous la forme d'un spectre qui sera lu et traité par le logiciel Iolite sur la plateforme Igor pro. Lors des analyses, des standards sont utilisés pour calibrer le spectromètre de masse. Les mesures sont faites avant, au milieu et en fin de prise de mesure de la totalité des échantillons afin de pouvoir correctement moyenne leur concentrer et être capable de repérer une déviance.

#### 2.5.2.3.1 Cartographie des pyrites

L'analyse est effectuée à l'université du Nouveau Brunswick à Fredericton (UNB) par Brandon Boucher dans le laboratoire de Chris MacFarlane. Le modèle de LA-ICP-MS utilisé est un système d'ablation laser Resonetics S-155-LR 193nm Excimer couplé avec un spectromètre de masse à source plasma Agilent 7700x

quadrupole. L'analyse se fait sur des lames minces et prend d'une à deux heures. Les pyrites sélectionnées sont analysées non comme un seul objet mais en une succession de lignes parallèles (Figure 2.7) qui formera, après traitement informatique, une cartographie de la pyrite. Chaque ligne apporte des informations sur la liste d'éléments prédéterminés : Li, B, S, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Te, Pb, Au. L'information est résumée dans un pixel. La totalité des pixels forme la cartographie de la pyrite. Les ablations se font à une vitesse de  $25\mu\text{m/s}$ , pour un diamètre de  $36\mu\text{m}$  et profondeur de  $8\text{-}10\mu\text{m}$ . Le faisceau a une énergie de  $50\text{mJ}$  et  $10\text{ Hz}$ . Entre chaque ligne, il y a un temps de  $25\text{ s}$  de nettoyage et chauffage. Le standard interne utilisé pour les pyrites est le Fe57 et les standards sont le NIST610 (verre) et le MASS-1 (sulfure et métaux de transition).



**Figure 2. 8 :** Cartographie de pyrite par méthode de ligne par le LA-ICP-MS à laser Resonetics S-155-LR 193nm Excimer couplé avec un spectromètre de masse à source plasma Agilent 7700x quadrupole du laboratoire de Chris Farlane à UNB.

#### 2.5.2.3.2 Éléments traces, majeurs et REE des tourmalines

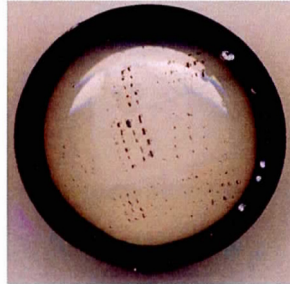
L'analyse est faite à l'université McGill à Montréal par Anna Jung dans le laboratoire GEOTOP de Vincent Van Hinsberg. Le modèle de LA-ICP-MS utilisé

est un système d'ablation laser NewWave 213 nm Nd-YAG couplé à un spectromètre de masse à source plasma Thermo iCAP Qc ICP-MS. L'analyse se fait sur minéraux entiers coulés dans un montage en époxy. Les tourmalines sont issues des 6 sites d'études. Par site, 8 tourmalines sont analysées dans les intervalles granulométriques 250-100  $\mu\text{m}$  et 60-100  $\mu\text{m}$ . Elles sont sélectionnées via la console du laser. La méthode de la ligne est choisie à défaut de celle du point du fait des inclusions que peuvent contenir les tourmalines. Les standards utilisés sont des NIST 160 (400ppm), NIST 612 (40ppm) et NIST 614 (4ppm). La largeur du faisceau est de 60  $\mu\text{m}$  avec 10  $\mu\text{m}$  de profondeur à 6 $\mu\text{m/s}$ . Le laser est continu à 10 Hz et 65% d'énergie. L'énergie du laser est de 0,244 mJ et une fluente 8,63 J/cm<sup>2</sup> et un flux gazeux d'hélium de 800ml. Le temps de lavage du laser est de 40s et de chauffage 30s. Pour cette analyse les éléments majeurs, traces et REE sont sélectionnés. Ceci nous permettra de voir s'il y a une variation entre les sites et dans quel(s) élément(s).

#### 2.5.2.3.3 Montage époxy

Afin d'être analysées en minéral isolé, les tourmalines sont coulées dans un montage époxy (Figure 2.8). Les tourmalines sélectionnées sont alignées sur du ruban adhésif double face. L'organisation des tourmalines permet de faire une carte qui permettra de retrouver les échantillons lors des analyses. Un morceau de polymère cylindrique de 1cm de haut est ensuite placé autour servant de moule pour la résine. L'époxy utilisé est de la Specifix. Il faut mélanger une dose de 80 gouttes de résine Specifix UN-no 3082 avec 47 gouttes de durcisseur Specifix-40 Curing Agent UN-no 2289 puis les mélanger. Une fois le mélange homogène, il peut être versé sur les tourmalines puis laisser à sécher pendant 24h. Le contact tape/époxy peut provoquer la formation de bulles lors du séchage au niveau des minéraux. Une fois sec le montage doit être poli afin de retirer les premiers 15  $\mu\text{m}$  d'épaisseur et accéder à l'intérieur des tourmalines. Une première abrasion est faite avec une poudre de carbure de silicium #1200 de la marque Struers. Lorsque l'échantillon est abrasé à la profondeur voulue, il peut être poli afin d'éliminer les

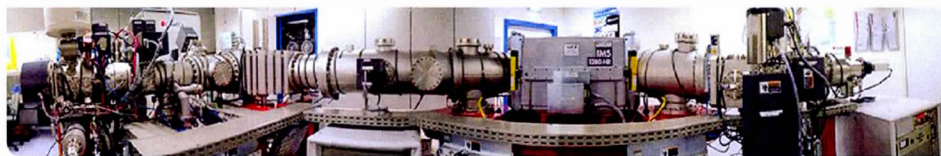
rayures et avoir un fini lisse. Cette étape se fait avec la machine à polir Buehler escorte 3 et le produit MasterPrep polishing suspension 0,05  $\mu\text{m}$  de Buehler.



**Figure 2. 9 :** Montage en epoxy contenant les tourmalines. La surface est légèrement abrasée puis polie pour être capable d'analyser l'intérieur des minéraux. Le montage est divisé en six sections contenant une vingtaine de tourmalines de différentes granulométries chacune.

#### 2.5.2.4 SIMS

L'analyse est faite au GFZ German Research Center for Geosciences à Potsdam en Allemagne par Robert Trumbull avec un SIMS 1280-HR. Il s'agit d'un spectromètre de masse à ionisation secondaire (Figure 2.9). Il utilise un faisceau d'ions fin et focalisé pour sonder l'échantillon. Un morceau d'échantillon est pulvérisé et ionisé. Ces ions sont accélérés dans le spectromètre de masse où ils sont alors séparés en fonction de leur rapport masse/charge. Sa sensibilité est au ppb avec une efficacité qui commence avec des échantillons de 200 picogrammes. Ce SIMS fournit pour les analyses isotopiques une répétabilité analytique descendant en dessous de 0.2 ‰ (1sd) pour la plupart des éléments majeurs dans une variété de matrices cristallines.



**Figure 2. 10 :** SIMS 1280-HR au GFZ de Potsdam, Allemagne, servant aux analyses de l'isotope du Bore dans les tourmalines. Les échantillons sont placés dans le coffret à gauche de l'image et envoyés vers la droite où se trouve le spectromètre de masse.

L'analyse est faite sur des cristaux de tourmalines isolés. Dans le cas de cette étude, il permet de mesurer la concentration d'isotope de Bore contenue dans chaque tourmaline des sites étudiés. La sélection des tourmalines et la préparation du support époxy sont les mêmes que pour l'analyse LA-ICP-MS. Avant l'analyse, il faut connaître la concentration en éléments majeurs des minéraux afin d'effectuer une correction de la matrice et de choisir les standards de comparaison. Cela peut être fait soit par microsonde, soit à partir des résultats LA-ICP-MS.

### **2.5.3 Par fraction granulométrique**

Les fractions sèches mises de côtés après le tamisage sont analysées par deux types de méthodes semi-quantitatives : Fluorescence aux Rayons X (XRF) et Diffraction aux Rayons X (XRD). Il est donc possible d'analyser chaque granulométrie de l'échantillon séparément.

#### **2.5.3.1 Fluorescence des rayons X**

La spectrométrie de fluorescence des rayons X est effectuée par le XL3 Nitton portable de l'UQAM. C'est une méthode d'analyse chimique non destructive qui permet de connaître la composition élémentaire d'un matériel c'est-à-dire des concentrations massiques en éléments. Pour l'analyse, les échantillons récupérés secs après l'étape de tamisage sont broyés au mortier, afin d'obtenir une poudre < 10 µm homogène, et tassés dans une capsule en polymère. Chaque analyse du Nitton dure 90 secondes sous le mode Mining. Durant les 90 secondes d'analyse, l'échantillon est bombardé avec des rayons X et réémet lui-même de l'énergie sous forme de rayons X. Cette énergie réémise correspond à la fluorescence X aussi appelée émission secondaire de rayons X. Ce spectre permet d'en déduire la composition élémentaire.



### 2.5.3.2 Diffraction des rayons X

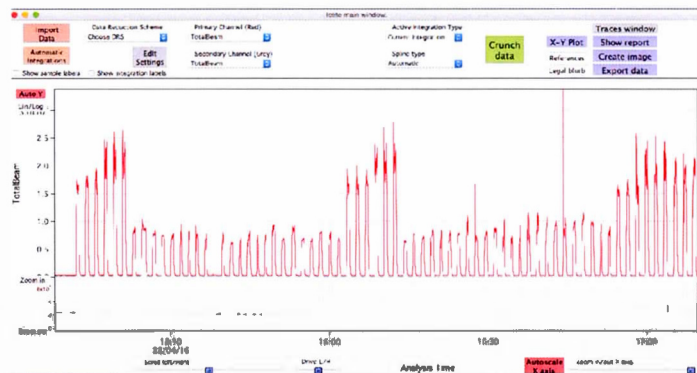
La diffractométrie de rayons X est effectuée par le Bruker D5000 dans le laboratoire de Michel Préda à l'UQAM. Cette méthode est basée sur la diffraction des rayons X sur la matière, ici la structure atomique et moléculaire des cristaux. Elle permet d'identifier les minéraux présents. Lors de l'analyse, un faisceau de rayons X est envoyé sur l'échantillon et est dispersé dans des directions spécifiques lorsqu'il rencontre un cristal. Un capteur mesure ensuite les angles et l'intensité des rayons réfractés pour chaque cristal et en forme une image tridimensionnelle de la densité électronique. À partir de cette densité, la position moyenne des atomes du cristal peut être déterminée, ainsi que leurs liaisons chimiques, leur entropie, etc., donnant ainsi l'identité du cristal. Pour l'analyse, chaque granulométrie d'échantillon est broyée au mortier afin d'obtenir une poudre  $<10\ \mu\text{m}$  sans aucun minéral orienté et tassé dans une plaquette solide de cobalt de 5 cm de diamètre (Xray  $\lambda$  : CoK $\alpha$ 1 : 1,78896). L'analyse est faite avec un angle d'intervalle de 3 à 90  $2\theta$  avec un pas d'angle de 0.02 et 0.6 sec par pas. Chaque analyse dure 15 minutes et le diffractogramme produit est envoyé au logiciel EVA (DIFFRAC.EVA de DIFFRAC.SUITE de Bruker). L'approche par granulométrie permet de suivre l'évolution quantitative des minéraux.

## 2.5.4 Traitement des données analytiques

### 2.5.4.1 Logiciel de traitement : plateforme Iolite sur IgorPro

Le spectre transmis par le spectromètre de masse est analysé par un logiciel de traitement spécifique : Iolite sur IgorPro. Le spectre regroupe les résultats d'analyses des 63 tourmalines et des trois standards (Figure 2.10). Chaque pic correspond à une mesure de standard ou de tourmaline. Le traitement de ce spectre se fait en plusieurs étapes. La première étape consiste à retirer le bruit de fond.

Il correspond au temps entre deux analyses ; l'effacer permet de distinguer chaque pic comme une analyse distincte. Les analyses de tourmalines peuvent être sélectionnées et rassemblées sous l'étiquette « output ». Les standards sont ensuite rassemblés suivant leur type (e.g. NIST 610, NIST 612, MASS 1) et reliées à l'étiquette de ce type dans le logiciel. Les données peuvent être réduites et extraites en fonction d'un élément qui ne varie pas dans le minéral (e.g. le Si dans la tourmaline, le S dans la pyrite). Cet élément est appelé le standard interne et une fois extrait, la totalité des données devra être multipliée par la valeur de ce standard interne. Pour le cas des tourmalines, on multiplie les données par Si = 16980000 ppm (valeur moyenne de la composition schorl-uvite-dravite).



**Figure 2. 11** : Plateforme iolite affichant le spectre transmis par le LA-ICP-MS. Chaque pic correspond à une analyse. Les pics les plus hauts correspondent aux analyses de standards (NIST 610, NIST 612 et NIST 614) et les plus bas aux tourmalines.

#### 2.5.4.2 Calcul des formules structurales

Les éléments majeurs des tourmalines sont étudiés sous forme d'oxyde, il faut donc les convertir. Pour passer d'une valeur en ppm à wt%, les données sont divisées par 10000. La concentration de l'élément est ensuite multipliée par la valeur du poids de la molécule divisé par le poids de l'élément.

Par exemple pour la molécule de  $\text{SiO}_2$  :  $\text{SiO}_2 = 28,08 + (2 \times 15,99) = 60,08 \rightarrow \text{SiO}_2 / \text{Si} = 60,08 / 28,08 = 2,14 \rightarrow \text{Si}_{\text{mesuré}} = 16,98 \times 2,14 = 36,33 \text{ wt\%}$

Ces éléments majeurs vont permettre de trouver la formule stœchiométrique et ainsi déterminer la nature des tourmalines. Pour ce faire, les données en wt% doivent être normalisées et mises sous forme cationique sur une base de Si=6 cations et 29 oxygènes.

Cette normalisation se fait en 8 étapes décrites ci-dessous :

- **Étape 1** : Le calcul du nombre de moles d'oxyde  
—> Masse molaire des oxydes x Nombre de cations dans l'oxyde
- **Étape 2** : Le calcul de mole en pourcentage d'oxyde dans le minéral  
—> Nombre de moles d'oxydes trouvé l'étape 1 x 100 / Somme de l'étape 1
- **Étape 3** : Le calcul de mole de cation  
—> Nombre de cations dans l'oxyde x Moles en pourcentage d'oxyde trouvé à l'étape 2
- **Étapes 4** : Le calcul de mole d'oxygène compté pour chaque cation  
—> Nombre de cations dans l'oxyde x Moles en pourcentage d'oxyde trouvé à l'étape 2
- **Étape 5** : Nombre de moles d'ion dans le minéral  
—> Mole de cation trouvé à l'étape 3 x 29 (Nombre d'oxygènes choisi) / Somme de l'étape 4
- **Étape 6** : Le calcul de normalisation avec Si = 6 cations
- Ces résultats permettent de remplir la formule minérale
- **Étape 7** : Le calcul des oxydes en wt%  
—> Masse molaire de l'oxyde / étape 6
- **Étape 8** : Le calcul du poids d'oxyde normalisé



### **CHAPITRE III :**

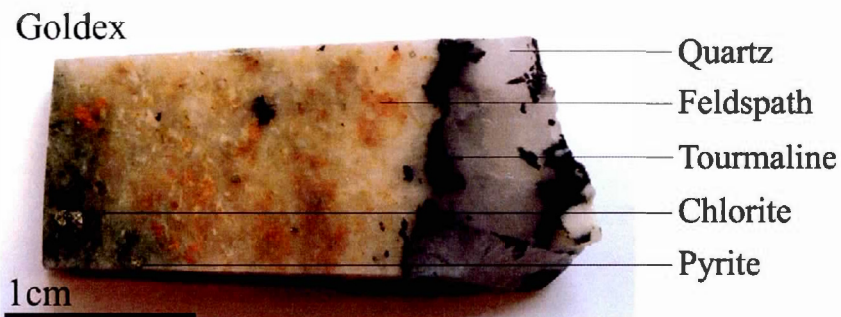
### **RÉSULTATS**

### 3.1 Association minérale dans la région de Val-d'Or

#### 3.1.1 Goldex

##### 3.1.1.1 Échantillon

L'échantillon 91 sélectionné pour l'étude a été récolté dans la mine de Goldex, au niveau de l'ancien puit minier à 134 m de profondeur (Figure 3. 1). L'échantillon 91 est issu d'un réseau de veines en stockewerk constitué d'un assemblage quartz-tourmaline-pyrite (Tableau 3.1).



**Figure 3. 1** : Échantillon analysé de Goldex. Il contient de la chlorite, des feldspaths et un assemblage de quartz-carbonate séparé des feldspaths plagioclase par une veine de tourmaline. Il contient des pyrites mm à  $\mu\text{m}$  disséminé dans le feldspath et la chlorite.

##### 3.1.1.2. Minéralogie des fractions granulométriques

Une étude fine de la minéralogie a été réalisée suivant le protocole décrit au chapitre 3. L'échantillon broyé et séparé a été analysé à la binoculaire, au microscope électronique à balayage couplé d'un EDX et par analyse de diffraction des rayons X (XRD), et au microscope polarisant.




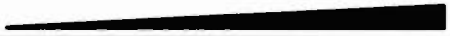











### 3.1.1.2.1 Analyses XRD et MEB-EDX

Dans chaque intervalle granulométrique choisi, la nature et la proportion de chaque minéral sont relevées (voir Annexe B). Les proportions sont mesurées lors d'analyses XRD une portion d'échantillon réduit en poudre. Les familles minérales présentent dans l'échantillon de veine QTC (quartz-carbonate-tourmaline) du gisement Goldex sont décrites dans le Tableau 3.2 ci-dessous.

La moitié de l'échantillon est composé de feldspath et un autre 40 % d'un assemblage à quartz-carbonate. Les 10 % restant se composent de tourmaline et de pyrite  $\pm$  albite, muscovite, hématite, rutile et quelques tellurobismuthites. La tourmaline est présente sous trois types où chacun est majoritairement représenté dans une granulométrie spécifique. Le schorl, riche en Fe, est le type majoritairement trouvé dans les granulométries  $> 250 \mu\text{m}$ , la uvite, riche en Ca-Mg, dans les granulométries  $< 100 \mu\text{m}$  et la dravite, riche en Mg, dans les granulométries  $< 60 \mu\text{m}$ . Cependant, la dravite est peu abondante dans cet échantillon comparé aux deux autres types.

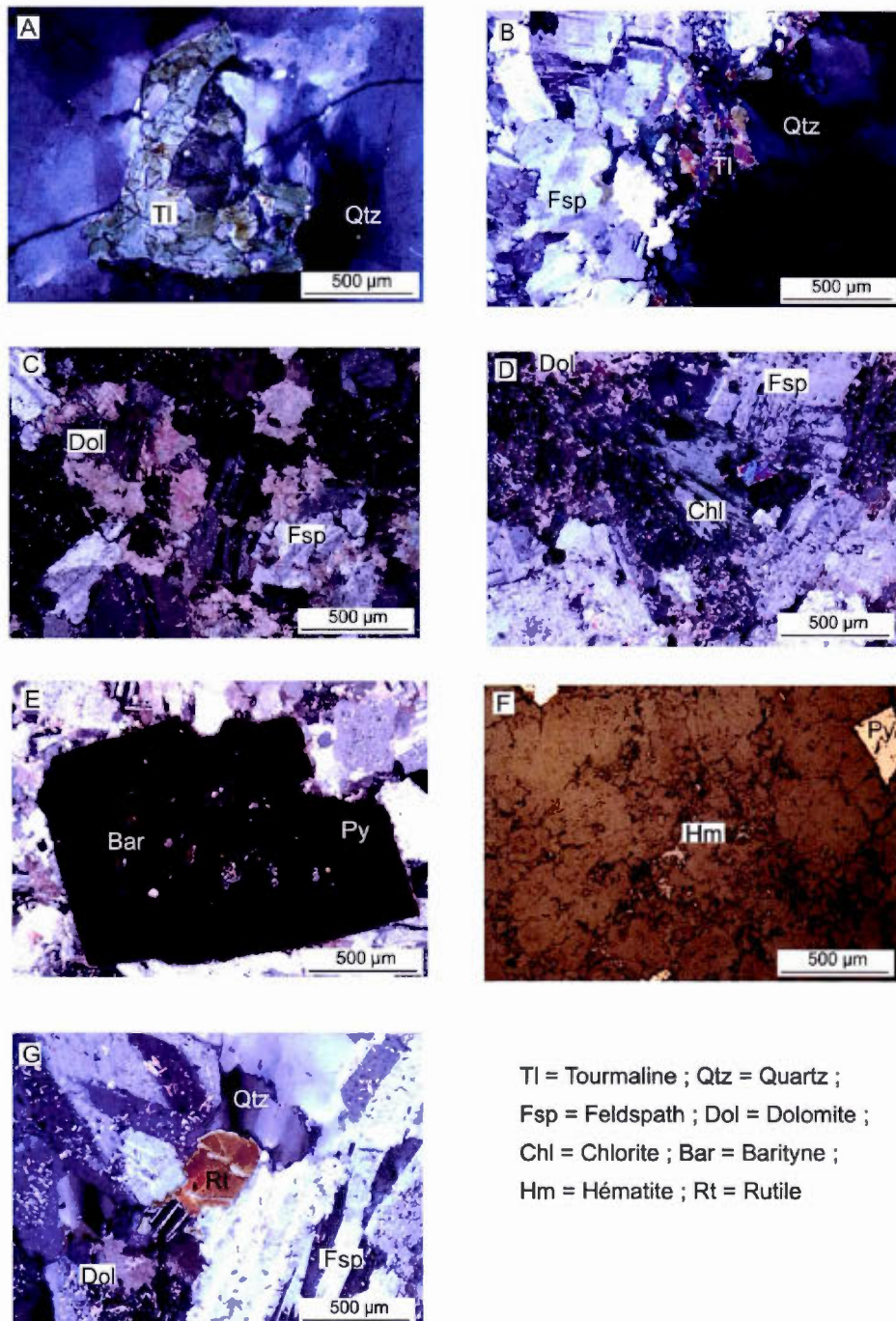
Les analyses au MEB-EDX indiquent que la pyrite est le seul sulfure de fer présent dans l'échantillon. Elle est caractérisée par un faciès cubique, pyritoédrique à massif, disséminée dans la veine. L'or est trouvé disséminé dans les pyrites et dans la veine même. Au sein de l'échantillon 91, chaque classe granulométrique présente le même assemblage minéralogique. La variation se situe dans la proportion respective des minéraux. Par ailleurs, de l'hématite oxydée (rouille) est présente dans toutes les granulométries de l'échantillon dans une proportion inférieure à 1 %. Cependant, elle n'apparaît qu'après la séparation par densité. Cette oxydation est donc reliée à la méthodologie.

**Tableau 3. 2 :** Minéralogie de l'échantillon 91 de Goldex telle que documentée à la binoculaire et au SEM-EDX, et mesurée au XRD.

| Famille Minérale    | Proportion | Espèces Minérales | Proportion en fonction de la granulométrie (µm)                                      |     |     |     |    |    |   |
|---------------------|------------|-------------------|--|-----|-----|-----|----|----|---|
|                     |            |                   | 1000   | 500 | 250 | 100 | 60 | 40 | 0 |
| Feldspath           | 50 %       | Albite            |    |     |     |     |    |    |   |
|                     |            | Microcline        |    |     |     |     |    |    |   |
| Carbonate           | 25 %       | Calcite           |    |     |     |     |    |    |   |
|                     |            | Dolomite          |    |     |     |     |    |    |   |
| Quartz              | 17 %       |                   |    |     |     |     |    |    |   |
| Tourmaline          | 2 %        | Schorl            |    |     |     |     |    |    |   |
|                     |            | Uvite             |    |     |     |     |    |    |   |
|                     |            | Dravite           |    |     |     |     |    |    |   |
| Pyrite              | 2 %        |                   |    |     |     |     |    |    |   |
| Mica                | 2 %        | Biotite           |    |     |     |     |    |    |   |
|                     |            | Muscovite         |    |     |     |     |    |    |   |
| Chlorite            | 2 %        |                   |   |     |     |     |    |    |   |
| Rutile+<br>Hématite | < 1 %      |                   |  |     |     |     |    |    |   |

### 3.1.1.2.2 Lames minces

La lame mince met en évidence trois zones successives (Figure 3. 2). La première zone se compose d'un assemblage de quartz polycristallin et de dolomite. Les carbonates sont très altérés et fracturés. Dans cet assemblage se trouvent également des tourmalines orientées de taille millimétrique qui sont zonées (Figure 3. 2 A). Une veinule de tourmaline de taille micrométrique dans le sens de la longueur sépare l'assemblage de la seconde zone contenant des feldspaths (Figure 3. 2 B et C). La troisième zone est celle des chlorites qui prennent la place des feldspaths (Figure 3. 2 D). Ce changement de zone peut correspondre au changement d'altération de proximale avec feldspath à distale avec la chlorite (chapitre 1).



**Figure 3. 2 :** Lamme mince issue de l'échantillon 91 de Goldex. Une alternance successive de quartz-carbonate (A et B), tourmaline (A), feldspath plagioclase (B, C et G) et chlorite (D) caractérise la lame. Des pyrites mm à µm cubiques sont disséminées dans la lame (E). Les plus massives contiennent des inclusions de barytine (E). La lame contient également de l'hématite spéculaire (F) et du rutile (G).



La pyrite est présente sur la totalité de la lame mince. Les pyrites sont de tailles variables (mm à  $\mu\text{m}$ ) avec un faciès cubique aux bordures altérées. Les plus larges contiennent un cœur plus poreux impliquant un polyphasage. Les porosités de la pyrite sont remplies de barytine (figure 3.2 E). Cette pyrite a été analysée par cartographie LA-ICP-MS. Les pyrites sont accompagnées d'hématite spéculaire (figure 3. 2 F). Des inclusions tardives de rutil sont également présentes (figure 3. 2 G).

#### 3.1.1.3. Succession paragénétique

Le quartz et les carbonates sont les premiers minéraux de l'assemblage. Les pyrites cristallisent en plusieurs générations amenant des quartz carbonates en même temps. Entre deux générations de pyrite est piégée de la barytine. Les plus grosses tourmalines sont altérées et postérieures au quartz. Les tourmalines en veinules de plus petite taille sont postérieures aux feldspaths. Les feldspaths cristallisent autour des pyrites. L'altération en chlorite arrive après celle des feldspaths. Les inclusions de rutil sont les plus jeunes de l'assemblage.

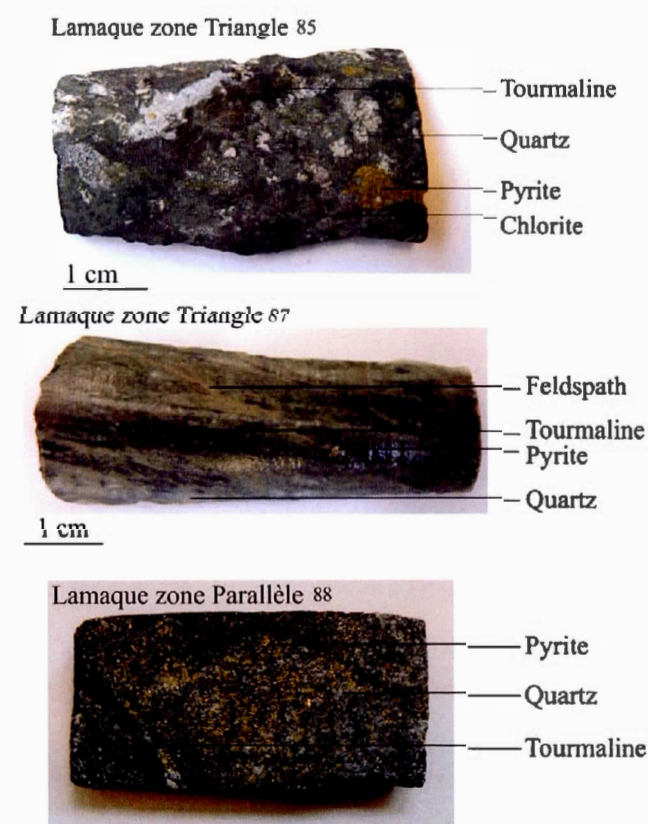
### 3.1.2 Lamaque

#### 3.1.2.1 Échantillons

Cinq échantillons de la carothèque du projet Lamaque ont été sélectionnés (Tableau 3.1) : quatre carottes minéralisées de la zone Triangle et une de la zone Parallèle (Figure 3. 3). L'encaissant des forages est un intrusif dioritique avec deux directions de veines : crack and seal, parallèle au cisaillement de la zone, et d'extension, perpendiculaire au cisaillement. L'échantillon 84 provient du forage TM-11-07 et correspond à une profondeur de 340 m. Il contient quasi exclusivement du carbonate et n'a pas été analysé. Les échantillons 85, 86 et 87 proviennent du forage TM-13 et correspondent à des profondeurs de 208,50 m,

pour le 85, à 211,55 m, pour le 87 (Figure 3. 3). Ce forage traverse une veine QTC avec 2 % de pyrite et finit dans la diorite avec 3 à 5 % de pyrite disséminée au niveau du 87. L'échantillon 86 contient quasi exclusivement du quartz et n'a pas été analysé. L'échantillon 88 provient du forage PV-10-10 à environ 212 m de profondeur. Il traverse une veine de QTC avec 5 % de pyrite.

### 3.1.2.2 Minéralogie des fractions granulométrique














**Figure 3. 3 :** Échantillon 85 (a) et 87 (b) de la zone Triangle et 88 (c) de la zone Parallèle. Ils présentent le même assemblage pyrite-quartz-tourmaline. Le 85 contient des zones à chlorite qui augmentent sur le 87.



#### 3.1.2.2.1 Analyses XRD et MEB-EDX

Les deux échantillons de la zone Triangle sont issus du même forage. L'échantillon 87 représente un niveau de 3 m inférieur à celui du 85. L'échantillon 85 est majoritairement composé de quartz-carbonate (Tableau 3. 3) (voir Annexe B). Le restant se compose d'un assemblage de tourmaline et sulfure de fer et  $\pm$  feldspath, apatite et phosphate. La tourmaline est présente sous trois types : le schorl, la uvite et la dravite. Chacune d'elle est associée à une granulométrie spécifique : le schorl est majoritaire dans les granulométries  $> 500 \mu\text{m}$ , la uvite est présente dans toutes les granulométries, mais est plus abondante dans les granulométries  $250\text{-}60 \mu\text{m}$ , et la dravite dans les granulométries  $< 100 \mu\text{m}$ .

**Tableau 3. 3 :** Minéralogie de l'échantillon 85 de la zone Triangle de Lamaque.  
Les minéraux sont identifiés par binoculaire et MEB-EDX.

| Familie Minérale     | Espèces Minérales | Proportion en fonction de la granulométrie (µm)                                      |     |     |     |    |    |   |
|----------------------|-------------------|--|-----|-----|-----|----|----|---|
|                      |                   | 1000   | 500 | 250 | 100 | 60 | 40 | 0 |
| Quartz               |                   |  |     |     |     |    |    |   |
| Carbonate            | Calcite           |  |     |     |     |    |    |   |
| Tourmaline           | Schorl            |  |     |     |     |    |    |   |
|                      | Uvite             |  |     |     |     |    |    |   |
|                      | Dravite           |  |     |     |     |    |    |   |
| Sulfure de fer       | Pyrite            |  |     |     |     |    |    |   |
|                      | Chalcopyrite      |  |     |     |     |    |    |   |
|                      | Pyrrhotite        |  |     |     |     |    |    |   |
|                      | Molybdénite       |  |     |     |     |    |    |   |
| Feldspath            | Albite            |  |     |     |     |    |    |   |
| Apatite et phosphate | < 1 %             |  |     |     |     |    |    |   |

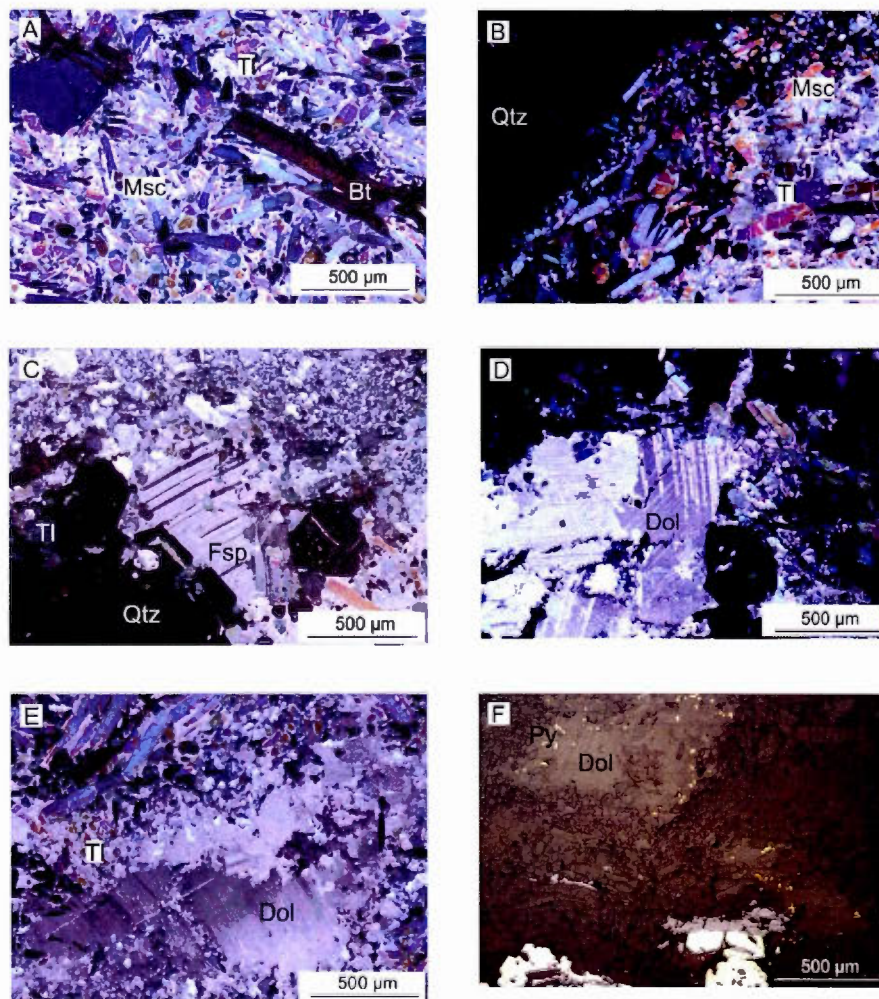






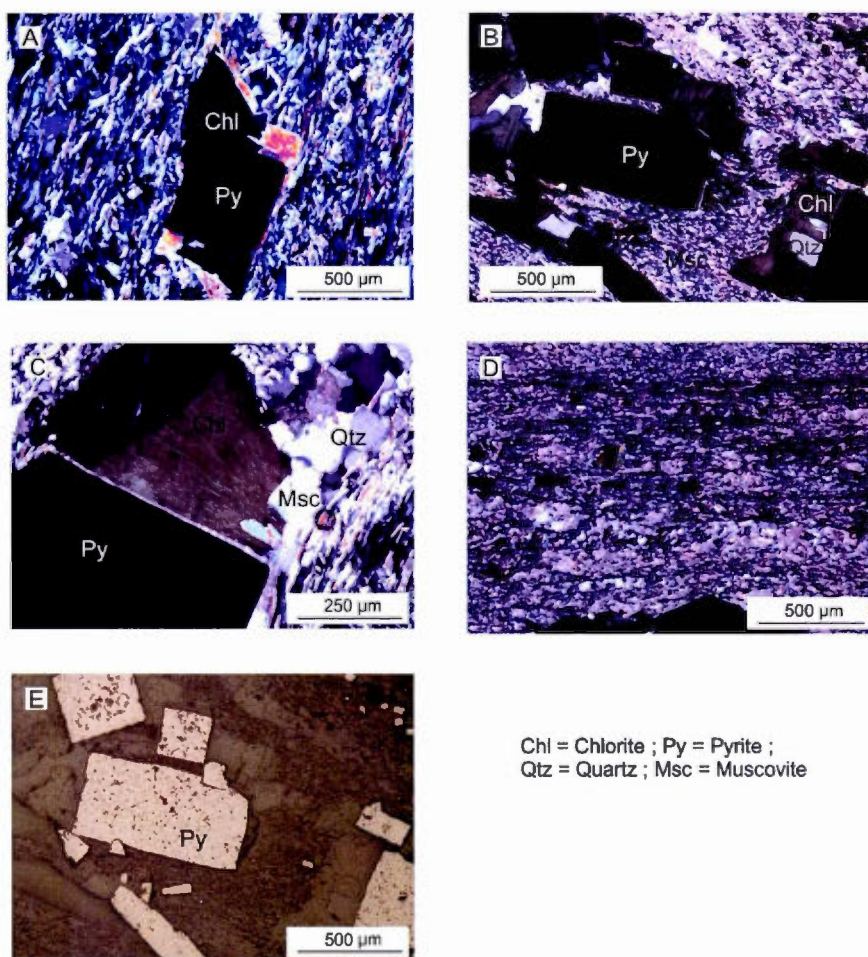
### 3.1.2.2.2 Lames minces

La lame mince de l'échantillon 85 de la zone Triangle contient 70 % de tourmaline (Figure 3. 4 A et B). Les biotites sont plus récentes que les quartz et plus vieilles que les tourmalines (Figure 3. 4 A). Les tourmalines recoupent les feldspaths et les pyrites (Figure 3. 4 C). Des tourmalines plus petites et orientées entourent les pyrites. Des dolomites ont complètement remplacé des pyrites (Figure 3. 4 D, E et F).



**Figure 3. 4 :** Lame mince de l'échantillon 85 de Lamaque zone Triangle. La lame est composée de tourmaline, muscovite, biotite (A), quartz (B), feldspath (C), dolomite (D et E) et pyrite (F). Tl= tourmaline, Msc=muscovite, Bt=biotite, Qtz=quartz, Dol=dolomite, Fsp=feldspath, Py= pyrite

La lame de l'échantillon 87 de la zone Triangle présente une orientation préférentielle (figure 3. 5). Cette schistosité est marquée par la tourmaline (30 %), la dolomite et la chlorite en veinules parallèles (Figure 3. 5 A, B, C et D). Les pyrites dans ce flux sont cubiques de 5 à 10 mm (Figure 3. 5 E). Elles sont entourées de dolomites et de quartz. La lame présente de rares biotites très altérées. La chlorite se met en ombre de pression autour sur les bords opposés des pyrites dans le sens de l'orientation des tourmaline (figure 3. 5 A, B, C et D).

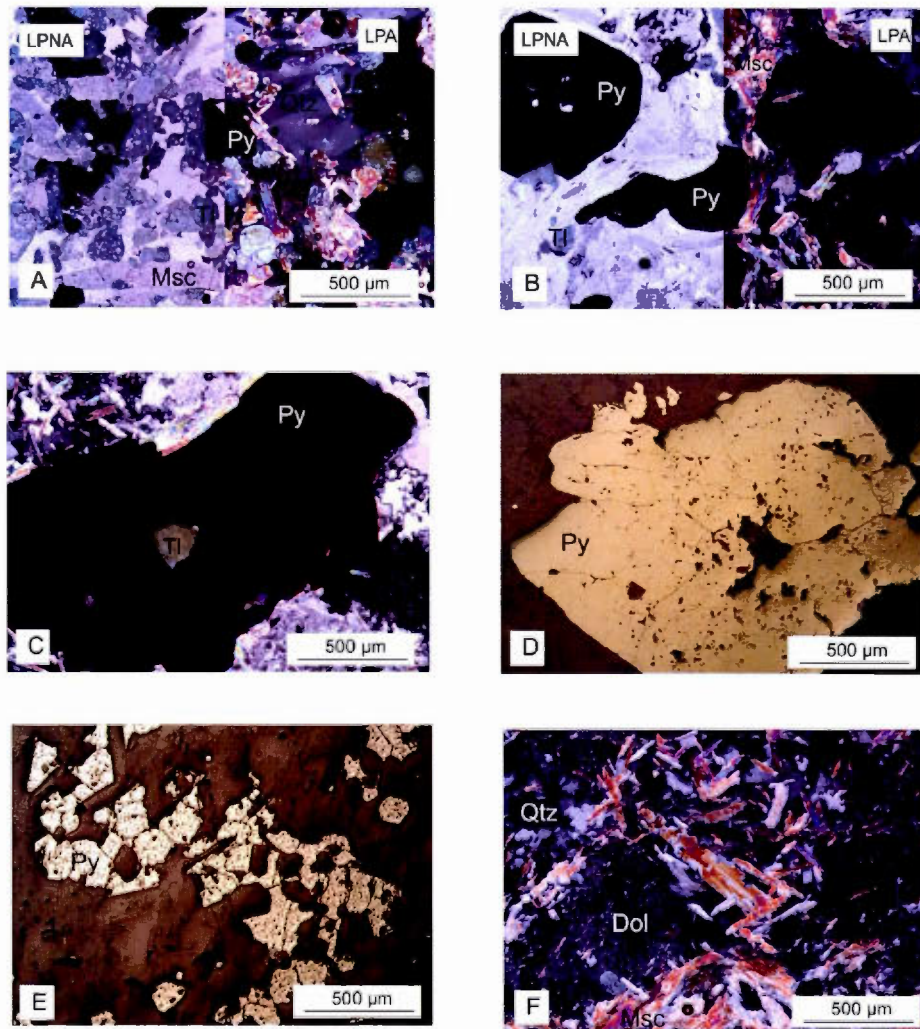


**Figure 3. 5 :** Lame mince de l'échantillon 87 de Lamaque zone Triangle présente du quartz directionnel, chlorite, tourmaline (A et D). Les pyrites sont cubiques avec des ombres de chlorites (B, C et E).

La lame de l'échantillon 88 de la zone Parallèle présente une orientation préférentielle avec beaucoup de mica entourant les pyrites (Figure 3. 6 A à E). Les



pyrites sont poreuses et fracturées, les plus petites sont très altérées (Figure 3. 6 E). Elles contiennent des inclusions de tourmalines (Figure 3. 6 F). Les tourmalines sont de taille supérieure et plus vieilles que les micas. Les chlorites de la lame se développent dans les feldspaths.



Msc= muscovite ; Ti= tourmaline ; Py= pyrite ; Qtz= quartz ; Dol= dolomite

**Figure 3. 6 :** Lame mince 88 de l'échantillon Lamaque zone Parallèle présente des pyrites altérées (A à E) avec de nombreuses inclusions de tourmalines et muscovites (F).

### 3.1.2.3. Succession paragénétique

Dans la zone Triangle, le premier assemblage est composé de quartz, dolomite et pyrite. La pyrite se présente en plusieurs générations toujours accompagnée de quartz et carbonate. Les feldspaths sont postérieurs aux pyrites et antérieurs aux biotites, lui-même antérieur aux tourmalines.

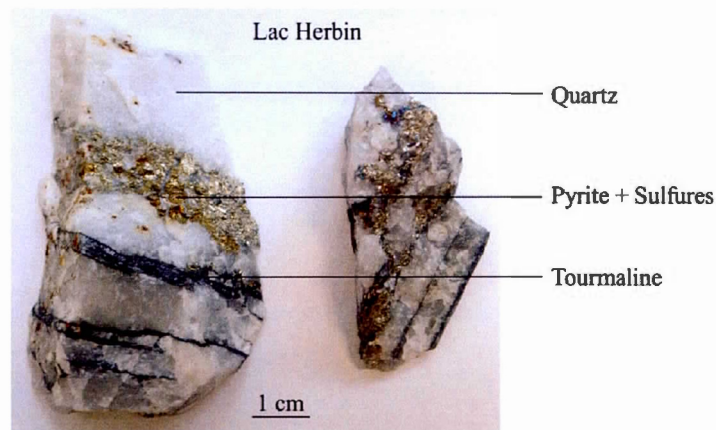
Dans l'échantillon 87, plus profond que le 85, l'abondance de chlorite est plus forte et une direction préférentielle est développée.

Dans la zone Parallèle, les minéraux sont arrangés selon une direction préférentielle. Le premier assemblage est composé de quartz, carbonate et pyrite. Les pyrites sont composées de plusieurs de générations qui s'accompagnent de quartz et carbonate. Les feldspaths sont postérieurs aux pyrites et antérieurs aux chlorites. Les tourmalines sont postérieures aux chlorites et antérieures aux muscovites.

## 3.1.3 Lac Herbin

### 3.1.3.1 Échantillon

Trois échantillons ont été récoltés dans la mine souterraine de Lac Herbin (Tableau 3.1). L'échantillon 72 est issu d'une veine subhorizontale au niveau 15 dans la zone S1. L'échantillon 73, également au niveau 15, est issu de la zone WE dans un cisaillement. L'échantillon 74 est issu d'une veine subhorizontale au niveau 25 de la mine. Seul l'échantillon 73 est retenu pour les analyses (Figure 3.7).



**Figure 3. 7 :** Échantillon 73 de la mine Lac Herbin

### 3.1.3.2 Minéralogie des fractions granulométriques













#### 3.1.3.2.1 Analyses XRD et MEB-EDX

L'échantillon 73 contient 90 % de quartz avec des carbonates, des tourmalines, des pyrites  $\pm$  clinocllore, mica, feldspath, chlorite et hématite (Tableau 3. 6) (voir Annexe B). La tourmaline est présente sous trois formes : le schorl et la dravite sont présents en plus grande proportion dans les granulométries  $< 100 \mu\text{m}$ , et la uvite dans l'intervalle 250-60. Le schorl est peu abondant dans cet échantillon. Les analyses au MEB-EDX indiquent que la pyrite est le sulfure de fer dominant dans l'échantillon. Elle est présente sous trois faciès : cubique dans les granulométries  $< 100 \mu\text{m}$ , pyrithoédrique dans les granulométries de 250 à 60  $\mu\text{m}$ , et massive dans les granulométries  $> 250 \mu\text{m}$ . La pyrite s'accompagne de pyrrhotite et de rare chalcopyrite. L'or est présent sous forme native et disséminée dans les pyrites.

Par ailleurs, comme pour Goldex, de l'hématite oxydée (rouille) est présente dans toutes les granulométries de l'échantillon dans une proportion inférieure à 1 %. L'oxydation peut également être attribuée à la méthodologie.



**Tableau 3. 6 :** Minéralogie de l'échantillon 73 de la mine de Lac Herbin les minéraux sont identifiés par binoculaire et MEB-EDX.

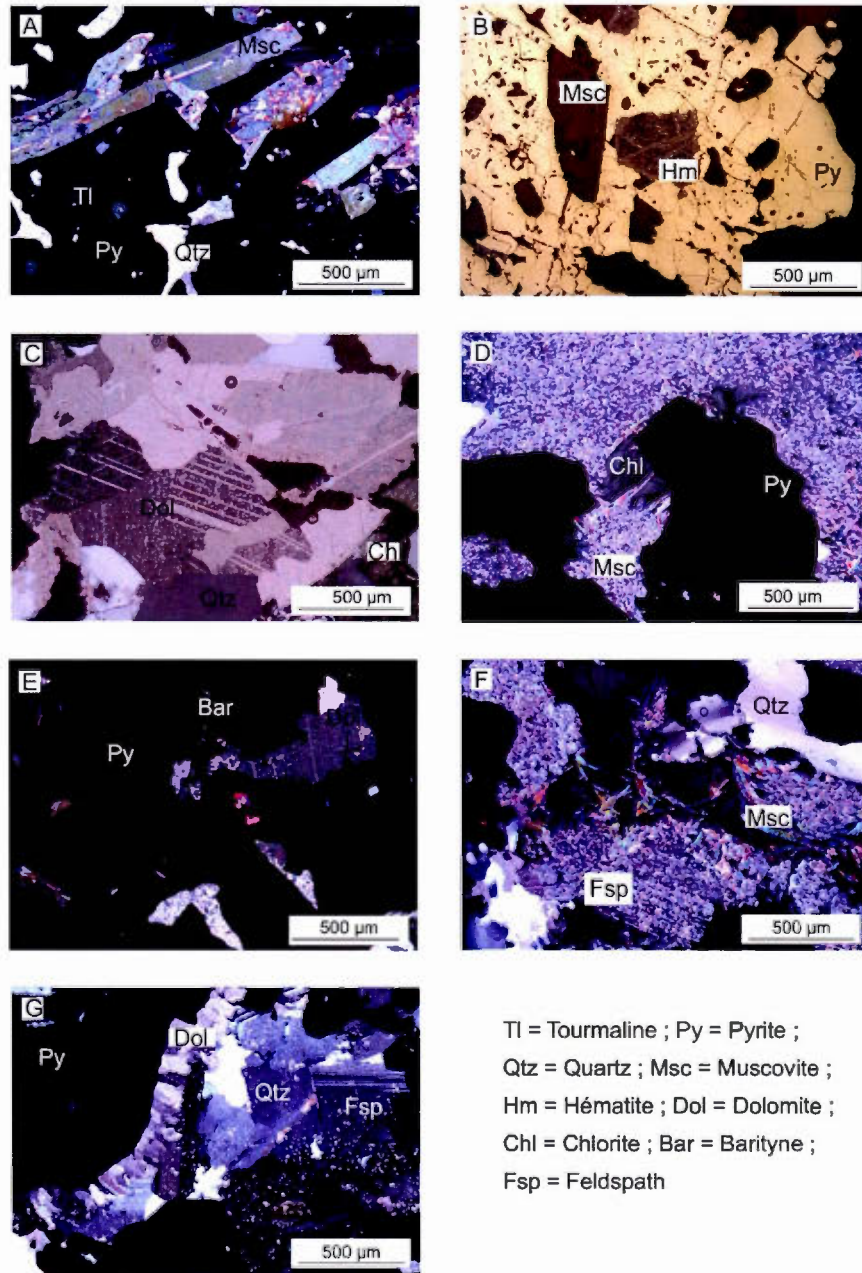
| Famille Minérale | Proportion | Espèces Minérales        | Proportion en fonction de la granulométrie (µm)                                     |     |     |     |    |    |   |
|------------------|------------|--------------------------|---|-----|-----|-----|----|----|---|
|                  |            |                          | 1000  | 500 | 250 | 100 | 60 | 40 | 0 |
| Quartz           | 90 %       |                          |   |     |     |     |    |    |   |
| Tourmaline       | 1 %        | Schorl                   |   |     |     |     |    |    |   |
|                  |            | Uvite                    |   |     |     |     |    |    |   |
|                  |            | Dravite                  |   |     |     |     |    |    |   |
| Sulfure de fer   | 1 %        | Pyrite                   |   |     |     |     |    |    |   |
|                  |            | Chalcopyrite, Pyrrhotite |   |     |     |     |    |    |   |
| Feldspath        |            | Anorthite                |   |     |     |     |    |    |   |
| Carbonate        | 4 %        | Calcite                  |   |     |     |     |    |    |   |
|                  |            | Dolomite                 |   |     |     |     |    |    |   |
| Chlorite         | 3 %        |                          |   |     |     |     |    |    |   |
| Mica             |            | Biotite                  |   |     |     |     |    |    |   |
| Hématite         |            |                          |  |     |     |     |    |    |   |

### 3.1.3.2.2 Lames minces

Plusieurs lames minces ont été préparées à partir des échantillons 72, 73 et 74 : 72-1, 72-2, 73, 74-1 et 74-2 (Figure 3. 8). La lame mince 72-1 se compose de pyrite massive fracturée dans du feldspath. Les pyrites font de 5 mm à 10 mm, sont très fracturées et poreuses. On observe en infiltration dans ses fissures des carbonates et du quartz

La lame mince 72-2 se compose majoritairement de pyrite, de quartz et de tourmaline. Les pyrites sont poreuses et fracturées (Figure 3. 8 A, B, C, D, E, F et G). Leur fracturation est proportionnelle à leur taille. En marge des grosses pyrites se trouvent des sulfates. Des inclusions de barytine sont présentes en inclusion dans une pyrite de 5 mm (Figure 3. 8 E). Celle-ci est cartographiée par LA-ICP-

MS. La lame présente également des feldspaths, de la dolomite et des chlorites qui se développent les deux précédents (Figure 3. 8 F et G). La muscovite se développe dans tous les minéraux.



**Figure 3. 8 :** Lames minces issues des échantillons 73 de Lac Herbin. Les pyrites sont très altérées et fissurées (A, B, D, E, F et G) avec des inclusions de tourmaline, muscovite (A), hématite (B), chlorite (D) et de barytine (E).

La lame mince 73 est majoritairement composée de quartz polycristallin. Les pyrites sont massives et arrondies. Elles sont poreuses au centre et très fracturées sur les bords. Leurs fractures sont remplies de carbonates. Des pyrites cubiques sont aussi présentes, mais de taille inférieure. La lame est traversée par une veine de tourmaline. Les pyrites contiennent des inclusions de chlorite.

Les lames minces 74-1 et -2 sont semblables avec une majorité de pyrites. Ce sont des pyrites poreuses et fracturées. Elles contiennent des inclusions de tourmaline et des marges de carbonate qui les séparent des quartz et des feldspaths.

### 3.1.3.3 Succession paragenétique

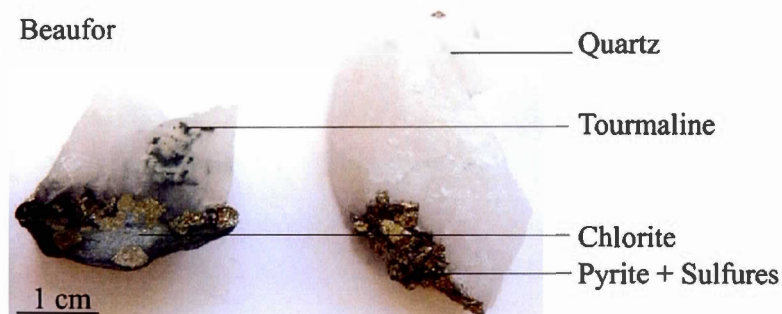
Les premiers minéraux sont les quartz, carbonates et pyrites. La pyrite se cristallise en plusieurs générations avec un du quartz et du carbonate l'accompagnant. Des feldspaths et des muscovites arrivent avant la dernière génération de pyrite.

## 3.1.4 Beaufor

### 3.1.4.1 Échantillon

Trois échantillons ont été récoltés au sous-niveau 22C-355 de la mine souterraine de Beaufor (Tableau 3.1). L'échantillon 9 est issu d'une veine QTC pentée à 25-30 ° au contact d'un dyke mafique décimétrique. L'encaissant est une granodiorite avec du quartz bleu et des sulfures disséminés sur environ 1 à 1,5 m au contact. En s'éloignant du contact, la teneur en sulfures (pyrite cubique de 1 cm) diminue de 5-10 % à <1 % sur les 50 premiers centimètres. Les échantillons 10 et 11 sont issus d'une veine de QTC de 50 cm à 2 m. Elle contient de la pyrite et chalcoppyrite en amas lenticulaire décimétrique et disséminé, et des veines boudinées dans le sens de la veine porteuse. La surface de fracture du quartz est orthogonale à l'allongement de la veine ce qui semble indiquer un cisaillement

*crack and seal*. L'échantillon 11 présente de la molybdénite grossière de taille centimétrique. Seul l'échantillon 10 est gardé pour les analyses (Figure 3. 9).



**Figure 3. 9 :** Échantillon 10 de la mine Beaufor

#### 3.1.4.2 Minéralogie des fractions granulométrique













##### 3.1.4.2.1 Analyse XRD et MEB-EDX

L'échantillon utilisé pour les analyses est composé à 80 % de quartz avec des carbonates, tourmalines, pyrite, chlorite et  $\pm$  mica et hématite (Tableau 3.7) (voir Annexe B). La tourmaline est présente sous ses trois types : le schorl, dans toutes les granulométries avec un maximum entre 40 et 100  $\mu\text{m}$ , la uvite et la dravite en proportion croissante vers les plus petites granulométries.

Les analyses au MEB-EDX indiquent que la pyrite est le sulfure de fer dominant l'échantillon. Elle se trouve dans toutes les granulométries avec une proportion un peu moins importante entre 40 et 250  $\mu\text{m}$ . Elle se trouve essentiellement avec un faciès cubique dans les granulométries  $< 60 \mu\text{m}$ , et massif  $> 60 \mu\text{m}$ . Les autres sulfures sont dans les granulométries  $> 60 \mu\text{m}$ . Elle s'accompagne de chalcoppyrite, pyrrhotite et molybdénite. L'or et l'argent sont natifs et en inclusion dans la pyrite ou ses fractures. L'or peut être associé à la tétradymite.



**Tableau 3. 7 :** Minéralogie de l'échantillon 10 de Beaufor les minéraux sont identifiés par binoculaire et MEB-EDX et leur proportion mesurée par XRD.

| Famille Minérale | Proportion | Espèces Minérales                     | Proportion en fonction de la granulométrie (µm)                                      |     |     |     |    |    |   |  |
|------------------|------------|---------------------------------------|--|-----|-----|-----|----|----|---|--|
|                  |            |                                       | 1000   | 500 | 250 | 100 | 60 | 40 | 0 |  |
| Quartz           | 80 %       |                                       |    |     |     |     |    |    |   |  |
| Carbonate        | 11 %       | Calcite                               |    |     |     |     |    |    |   |  |
|                  |            | Dolomite                              |    |     |     |     |    |    |   |  |
|                  |            | Scheelite                             |    |     |     |     |    |    |   |  |
| Tourmaline       | 2 %        | Schorl                                |    |     |     |     |    |    |   |  |
|                  |            | Uvite                                 |    |     |     |     |    |    |   |  |
|                  |            | Dravite                               |    |     |     |     |    |    |   |  |
| Sulfure de fer   | 5 %        | Pyrite                                |    |     |     |     |    |    |   |  |
|                  |            | Chalcopyrite, Pyrrhotite, Molybdénite |    |     |     |     |    |    |   |  |
| Chlorite         | 5 %        |                                       |    |     |     |     |    |    |   |  |
| Mica             | 1 %        | Biotite                               |  |     |     |     |    |    |   |  |
|                  |            | Muscovite                             |  |     |     |     |    |    |   |  |

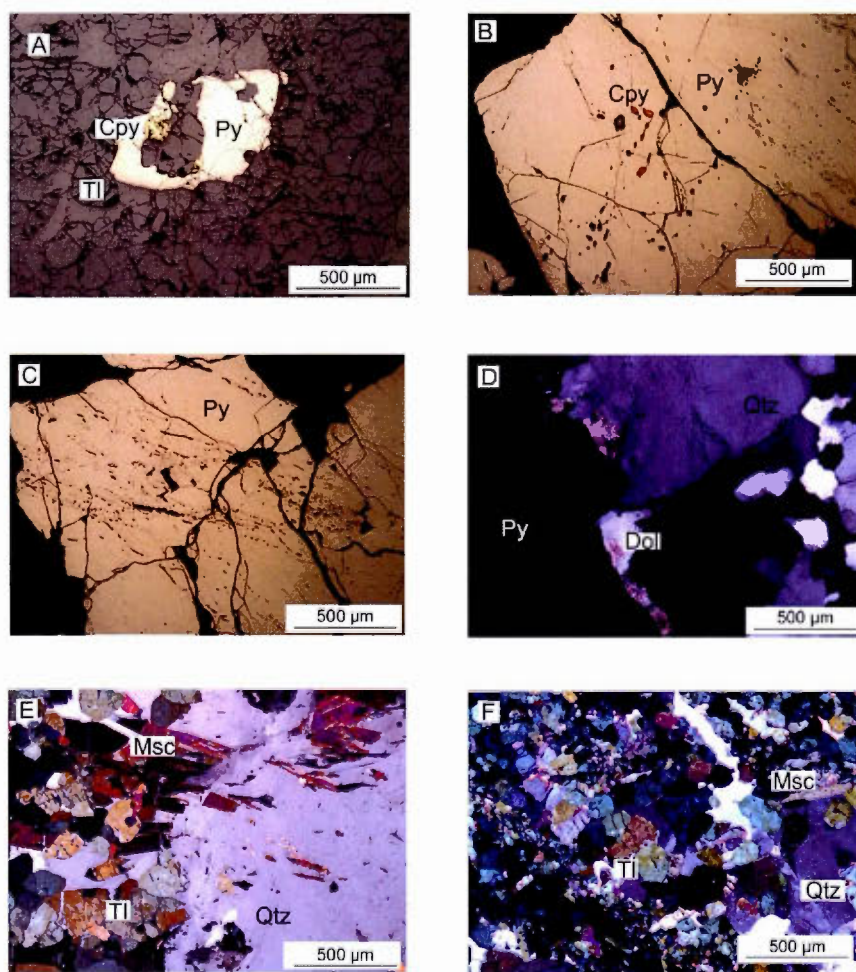
### 3.1.4.2.2 Lames minces

Plusieurs lames minces ont été préparées à partir des échantillons 9 et 10 : 9, 10-1 et 10-2 (Figure 3. 10). La lame mince 9 montre des minéraux opaques : des pyrites cubiques très fracturées avec des inclusions de quartz. Elles peuvent présenter des petites auréoles et des fractures. La chlorite est présente avec une orientation préférentielle, avec du quartz polycristallin, des carbonates et de l'hématite.

La lame 10-1 est prise dans une veine de quartz. Les pyrites sont cubiques, centimétriques, fracturées et poreuses. Il y a une majorité de quartz polycristallins et des carbonates.

La lame 10-2 est composée à 70 % de tourmaline et de muscovite. Les deux types de minéraux ont des directions préférentielles orthogonales. Les minéraux

opaques sont de plusieurs natures : des pyrites, des chalcopyrites et de l'hématite. Les pyrites sont très altérées et fracturées (Figure 3. 10 A, B et C). Elles présentent un cœur poreux (Figure 3. 10 B et C). Les pyrites contiennent des inclusions de chalcopyrites (Figure 3. 10 A). Les pyrites mises en place dans le quartz sont moins altérées et présentent une fine couche de carbonate à ses bords qui les séparent du quartz (Figure 3. 10 D et E). Les tourmalines sont plus jeunes que les muscovites (Figure 3. 10 F).



Cpy = Chalcopyrite ; Py = Pyrite ; Tl = Tourmaline ; Msc = Muscovite ; Qtz = Quartz ; Dol = Dolomite

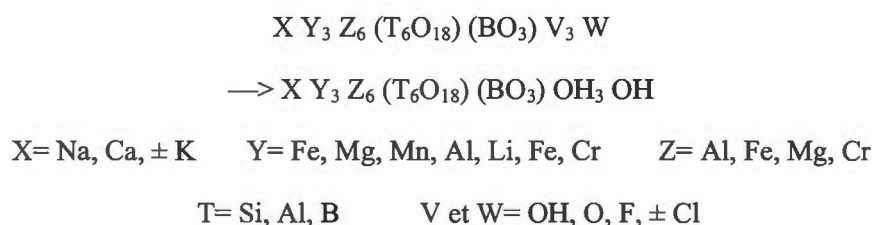
**Figure 3. 10 :** Lames minces issues des échantillons (a) 9, (b) 10-1 et (c) 10-2 de la mine Beaufor. Les pyrites présentent de cœurs poreux et des inclusions de chalcopyrite (A, B et D). La muscovite et la tourmaline sont en inclusion sur le quartz (C et F).

### 3.1.4.3 Succession paragénétique

Les quartz et les carbonates sont les premiers à se mettre en place avec les pyrites. La muscovite puis les tourmalines se mettent en place et recoupent les pyrites. Dans la partie quartz, des pyrites se mettent en place avec des auréoles de carbonates.

## 3.2 Les Tourmalines

La tourmaline forme un supergroupe contenant 18 espèces minérales décrites et approuvées par la commission des nouveaux minéraux et noms de minéraux de l'association internationale de minéralogie et publiée par Henry *et al.* (2011). Sa diversité d'espèces est résumée dans la formule structurale complexe suivante :



Les tourmalines les plus abondantes appartiennent au groupe des tourmalines alcalines : le schorl ( $NaFe_3Al_6 (BO_3)_3 (Si_6O_{18})(OH)_4$ ), l'elbaite ( $Na (Li, Al)_3Al_6 (BO_3)_3 (Si_6O_{18})(OH)_4$ ) et la dravite ( $NaMg_3Al_6 (BO_3)_3 (Si_6O_{18})(OH)_4$ ) (Henry *et al.*, 2011).

La variété d'espèces de tourmaline est due à sa grande fenêtre de stabilité allant des conditions Pression-Température-Composition à proximité de la surface dans la croûte à celles du manteau. La tourmaline acquiert lors de sa formation la signature chimique de son environnement de croissance et enregistre les changements de paragenèse. La tourmaline est un bon indicateur de composition et de provenance des fluides (Henry *et al.*, 2011 ; Van Hinsberg *et al.*, 2011 ; Dutrow et Henry, 2011).

### 3.2.1 Problématique spécifique

Les tourmalines échantillonnées sont des tourmalines hydrothermales, peu fracturées et peu incluses (Annexe 1). Certaines présentent une zonation (Figure 3.2 A). La tourmaline est un minéral commun dans les gisements hydrothermaux, spécialement, dans les veines de quartz minéralisées. Sa croissance et sa vitesse de croissance dépendent de la concentration en bore et d'eau dans les fluides la formant (Van Hinsberg, 2011 ; Dutrow et Henry, 2011). Le travail fait à la binoculaire et au SEM-EDX a permis de confirmer l'identité du supergroupe des tourmalines et de les placer dans le groupe alcalin. L'analyse au LA-ICP-MS sur 48 tourmalines permet de confirmer les sous-groupes grâce à leur composition chimique précise et d'en apprendre plus sur l'évolution de la composition de son environnement de formation. Le laser du ICP-MS à un diamètre 60 $\mu$ m et arrache de la matière sur 10 $\mu$ m de profondeur. La taille des tourmalines sélectionnées (250 à 50  $\mu$ m) pour les analyses géochimiques comparée à celle du laser ne permet pas une analyse dans la largeur des tourmalines qui aurait permis une analyse des zonations. Les tourmalines sont analysées sur leur longueur (annexe C) ce qui nous indique une composition chimique unique (une seule zonation) mais précise.

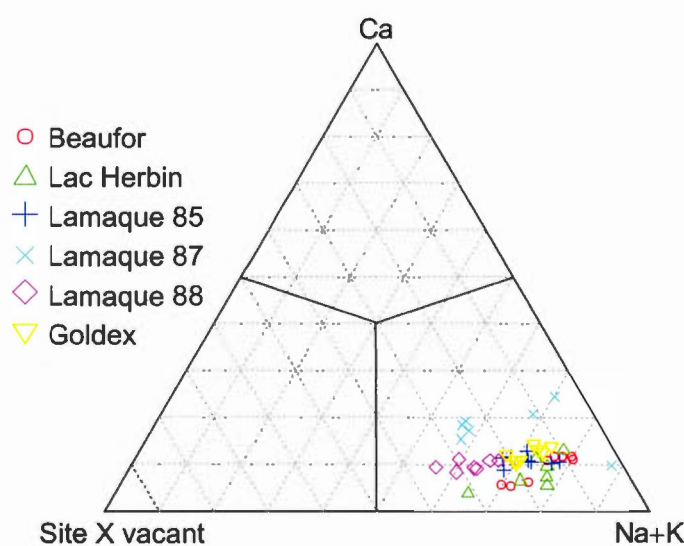
### 3.2.2. Résultats

#### 3.2.2.1 Analyses des éléments majeurs

Les tourmalines de Val-d'Or analysées révèlent une composition homogène au sein des échantillons et entre les gisements. Les résultats chimiques sont présentés dans l'annexe D et résumés dans le tableau 3. 8. Sur les 48 tourmalines analysées, deux d'entre elles, une issue de l'échantillon 87 et une de 88, montrent des variations importantes en Ca et Mn. Ces deux tourmalines sont fracturées



(Annexe C). Ces anomalies peuvent être liées aux fractures et à un remplissage plus riche en Ca et Mn. Pour une meilleure approche, ces deux points excentrés ne sont pas pris en compte. De plus, le Si sert de standard interne pour les analyses ; il n'est donc pas représenté dans les diagrammes. Basé sur la classification de Henry *et al.* (2011), le diagramme d'occupation du site X indique que les tourmalines des quatre mines du district minier de Val-d'Or appartiennent au groupe des tourmalines alcalines (Figure 3. 11). Leur formule structurale est :



**Figure 3. 11** : Diagramme de classification des tourmalines basée sur l'occupation du site X d'après Henry *et al.* (2011), des tourmalines de Val-d'Or.

D'après le diagramme ternaire Al-Fe-Mg et le diagramme  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  vs  $\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$  (Figure 3. 12 a et b), les tourmalines analysées ont une composition chimique entre les pôles du schorl (riche en Fe) et de la dravite (riche en Mg) avec une composition à la transition des deux pôles en uvite (riche en Ca-Mg). Les tourmalines des gisements Beaufor et Lac Herbin (10 et 73) ont une composition dravitique tandis que les gisements Lamaque et Goldex (85, 88 et 91) ont une composition schorlitique. Le gisement Lamaque zone Triangle (87) est composé des deux types de tourmaline.

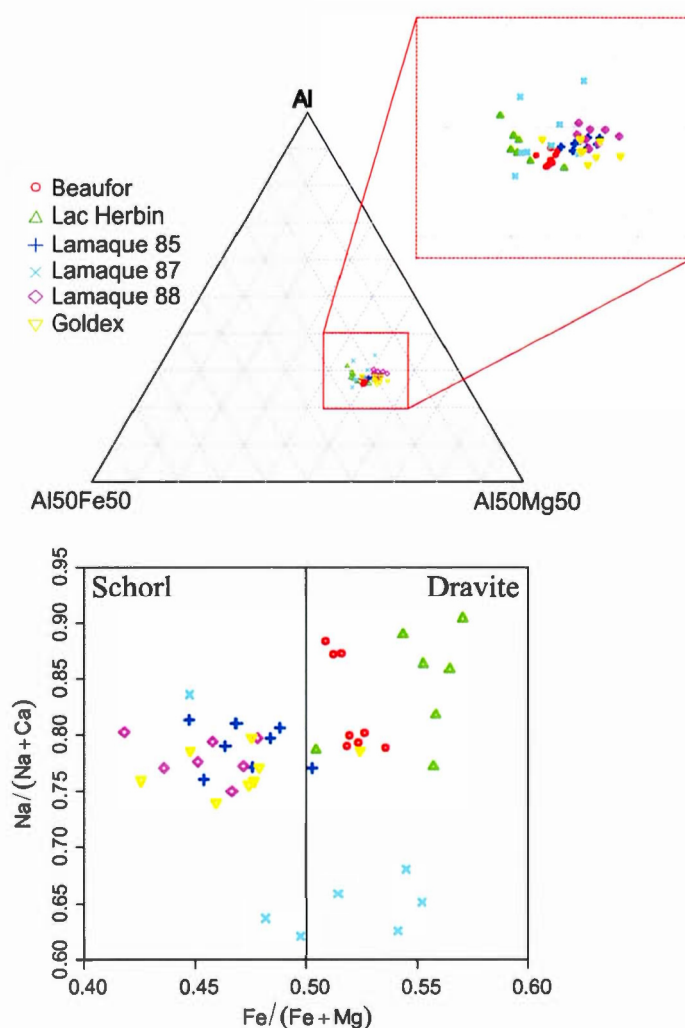
**Tableau 3.8 :** Résumé des concentrations en éléments majeurs dans les tourmalines du district de Val-d'Or en wt % et en cation avec Si=6 et O=29. Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons de Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87), Lac Herbin (73) et Beaufor (10). Var = variation ; Moy = moyenne ; ET= écart type.

| (ppm)                          | Goldex      |       |      | Lamaque        |       |      |               |       |      | Lac Herbin  |       |      | Beaufor     |       |      |
|--------------------------------|-------------|-------|------|----------------|-------|------|---------------|-------|------|-------------|-------|------|-------------|-------|------|
|                                | Var         | Moy   | ET   | Zone Parallèle |       |      | Zone Triangle |       |      | Var         | Moy   | ET   | Var         | Moy   | ET   |
| SiO <sub>2</sub>               | 33,99-35,33 | 34,78 | 0,39 | 33,24-35,73    | 34,81 | 1,18 | 30,96-38,34   | 34,87 | 1,7  | 33,82-35,68 | 34,67 | 0,68 | 35,10-36,27 | 35,81 | 0,47 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,12-0,65   | 0,38  | 0,19 | 0,41-0,10      | 0,25  | 0,1  | 0,35-3,96     | 1,59  | 1,29 | 0,18-0,64   | 0,32  | 0,16 | 0,26-0,48   | 0,34  | 0,07 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 34,21-36,57 | 35,4  | 0,85 | 34,77-37,85    | 36,03 | 1,26 | 30,71-37,25   | 34,85 | 1,66 | 36,33-39,12 | 37,46 | 0,96 | 33,23-35,86 | 34,27 | 0,84 |
| FeO                            | 5,62-6,23   | 5,97  | 0,24 | 5,71-6,42      | 6,13  | 0,25 | 3,70-6,49     | 5,16  | 0,7  | 4,05-4,88   | 4,48  | 0,29 | 4,65-5,60   | 5,16  | 0,36 |
| MgO                            | 6,81-7,32   | 7,1   | 0,19 | 5,77-7,24      | 6,47  | 0,45 | 5,81-7,13     | 6,73  | 0,41 | 6,57-7,33   | 6,88  | 0,26 | 6,55-8,09   | 7,49  | 0,47 |
| MnO                            | 0,01        | 0,01  | 0    | 0,00-0,01      | 0,01  | 0    | 0,01-0,11     | 0,02  | 0,2  | 0,02-0,04   | 0,03  | 0,01 | 0,01        | 0,01  | 0    |
| CaO                            | 0,64-0,29   | 0,51  | 0,16 | 0,22-0,71      | 0,45  | 0,17 | 0,49-5,52     | 1,07  | 1,21 | 0,46-2,43   | 0,78  | 0,67 | 0,57-0,79   | 0,69  | 0,08 |
| Na <sub>2</sub> O              | 2,38-2,08   | 2,26  | 0,1  | 2,03-2,33      | 2,22  | 0,12 | 1,63-2,80     | 2,05  | 0,28 | 1,64-1,99   | 1,86  | 0,11 | 2,08-2,30   | 2,2   | 0,08 |
| K <sub>2</sub> O               | 0,007-0,014 | 0,01  | 0    | 0,005-0,013    | 0,01  | 0    | 0-0,01        | 0     | 0    | 0,003-0,004 | 0     | 0    | 0,005-0,009 | 0,01  | 0    |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,009-0,011 | 0,01  | 0,5  | 0,477-0,0003   | 0,07  | 0,18 | 0,001-0,13    | 0,02  | 0,03 | 0,001-0,105 | 0,02  | 0,04 | 0,0002-0,13 | 0,07  | 0,05 |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 9,84-10,23  | 10,08 | 0,34 | 10,62-9,63     | 10,08 | 0,34 | 8,96-11,10    | 10,1  | 0,49 | 9,79-10,33  | 10,04 | 0,2  | 10,16-10,50 | 10,37 | 0,14 |
| H <sub>2</sub> O               | 3,39-3,53   | 3,48  | 0,04 | 3,32-3,66      | 3,48  | 0,12 | 3,09-3,71     | 3,48  | 0,17 | 3,38-3,56   | 3,46  | 0,07 | 3,52-3,60   | 3,58  | 0,05 |
| ZnO                            | 0,006-0,011 | 0,01  | 0    | 0,007-0,014    | 0,01  | 0    | 0,004-0,017   | 0,03  | 0,02 | 0,017-0,009 | 0,01  | 0    | 0,01-0,02   | 0,12  | 0    |
| Total                          | 99,99       |       |      | 100,01         |       |      | 100,04        |       |      | 100,01      |       |      | 100,12      |       |      |

Cations par unité de formule normalisée sur la base de Si =6 cations

| Si | 6           | 6    | 6    | 0    | 6           | 6    | 6    | 0           | 6     | 6    | 6           | 0    | 6    | 6           | 0    |
|----|-------------|------|------|------|-------------|------|------|-------------|-------|------|-------------|------|------|-------------|------|
| Na | 0,69-0,80   | 0,76 | 0,04 | 0,04 | 0,64-0,78   | 0,74 | 0,05 | 0,56-0,87   | 0,68  | 0    | 0,56-0,66   | 0,62 | 0,04 | 0,67-0,74   | 0,71 |
| Mg | 1,75-1,88   | 1,83 | 0,05 | 0,05 | 1,40-1,94   | 1,67 | 0,17 | 1,61-1,87   | 1,73  | 0,15 | 1,64-1,86   | 1,78 | 0,08 | 1,66-2,01   | 1,87 |
| Al | 6,93-7,47   | 7,2  | 0,22 | 0,22 | 6,71-8,05   | 7,33 | 0,5  | 6,88-7,74   | 7,08  | 0,55 | 7,20-8,08   | 7,65 | 0,31 | 6,48-7,21   | 6,77 |
| K  | 0,002-0,003 | 0    | 0    | 0    | 0,001-0,002 | 0    | 0    | 0,001-0,003 | 0     | 0    | 0,00-0,001  | 0    | 0    | 0,001-0,002 | 0    |
| Ca | 0,05-0,11   | 0,09 | 0,03 | 0,03 | 0,05-0,13   | 0,08 | 0,03 | 0,09-0,24   | 0,2   | 0,25 | 0,09-0,46   | 0,15 | 0,13 | 0,10-0,13   | 0,12 |
| Ti | 0,01-0,08   | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,01-0,05   | 0,03 | 0,01 | 0,04-0,54   | 0,21  | 0,17 | 0,02-0,08   | 0,04 | 0,02 | 0,03-0,06   | 0,04 |
| Cr | 0,00-0,02   | 0    | 0    | 0    | 0,00-0,06   | 0,01 | 0,02 | 0,00-0,01   | 0,003 | 0    | 0,00-0,01   | 0    | 0    | 0,00-0,01   | 0,01 |
| Mn | 0,001-0,002 | 0    | 0    | 0    | 0,00-0,002  | 0    | 0    | 0,00-0,01   | 0,003 | 0    | 0,003-0,007 | 0    | 0    | 0,00-0,001  | 0    |
| Fe | 0,80-0,89   | 0,86 | 0,04 | 0,04 | 0,81-0,93   | 0,88 | 0,05 | 0,63-0,77   | 0,74  | 0,05 | 0,59-0,70   | 0,65 | 0,05 | 0,64-0,78   | 0,72 |
| B  | 3           | 3    | 0    | 0    | 3           | 3    | 0    | 3           | 3     | 0    | 3           | 3    | 0    | 3           | 3    |
| H  | 4           | 4    | 0    | 0    | 4           | 4    | 0    | 4           | 4     | 0    | 4           | 4    | 0    | 4           | 4    |

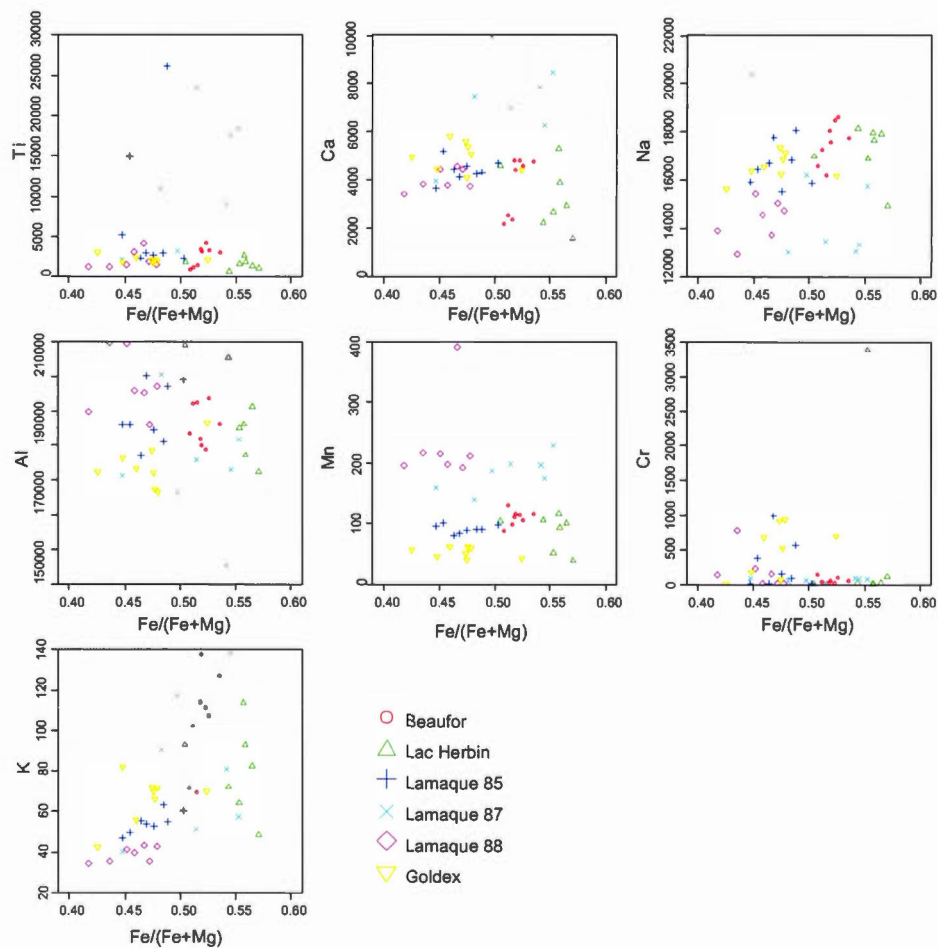
Les tourmalines se forment plus facilement autour de tourmalines préexistantes plutôt qu'avec une nouvelle nucléation. L'étude des lame minces des échantillons permet d'observer des zonations dans les tourmalines les plus grandes (Figure 3.2 A). L'étude granulométrique des trois types de tourmalines (schorl, uvite et dravite) indique que les schorls sont généralement les tourmalines les plus grandes (500-100 $\mu$ m environ). Cela suggère une zonation des tourmalines de type dravite à schorl. Les gisements de Lac Herbin et Beaufor aurait alors des tourmalines peut zonée.



**Figure 3. 12:** (a) Diagramme Al-Fe-Mg de classification des sous-types des tourmalines de Val-d'Or et (b) Diagramme  $Mg/(Fe+Mg)$  vs  $Na/(Na+Ca)$  de classification des sous-types des tourmalines de Val-d'Or.

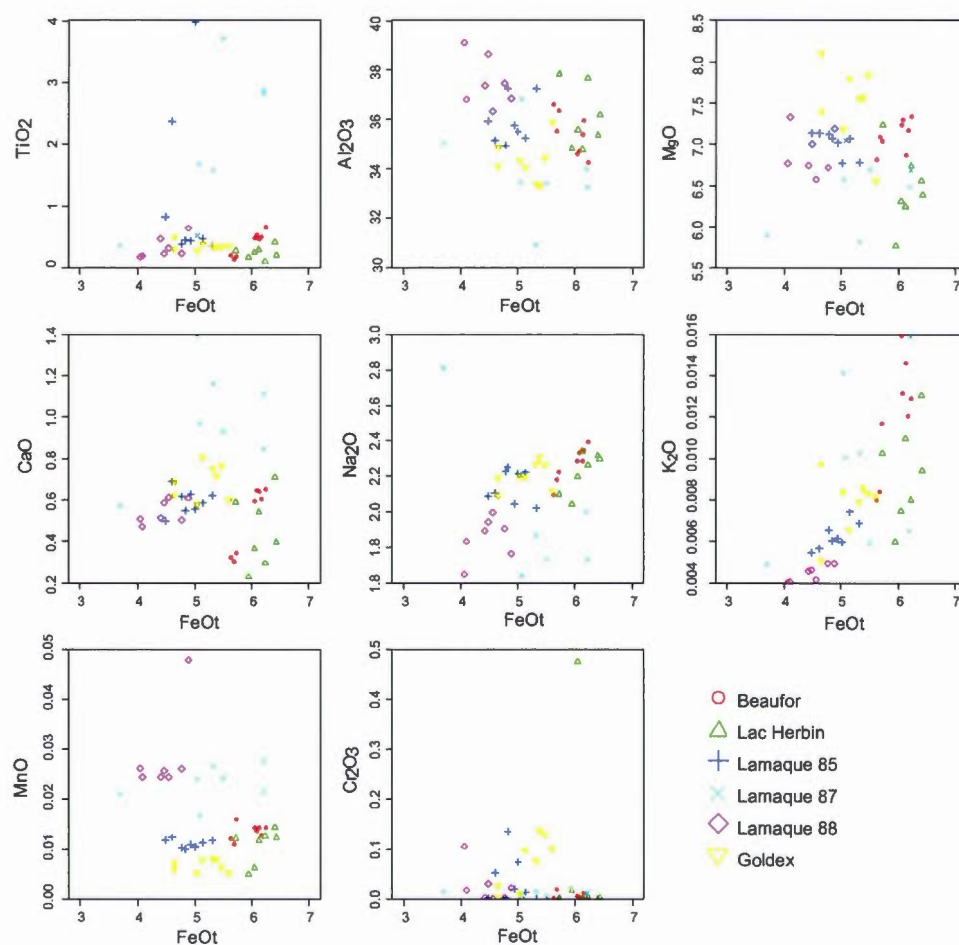
Le rapport  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  des tourmalines analysées varie de 0,62 à 0,78 ppm (Figure 3. 13). Ce rapport montre des corrélations positives pour Ca, Na et K.

FeOt montre des corrélations positives pour CaO, Na<sub>2</sub>O et K<sub>2</sub>O (Figure 3. 14) et le K<sub>2</sub>O corrèle positivement avec CaO et Na<sub>2</sub>O et FeOt (Figure 3.15). Il y a une substitution de ces éléments dans le site X et Y des tourmalines. Les maximums sont toujours atteints par les tourmalines de Lac Herbin et Beaufor, qui sont plus dravitiques.

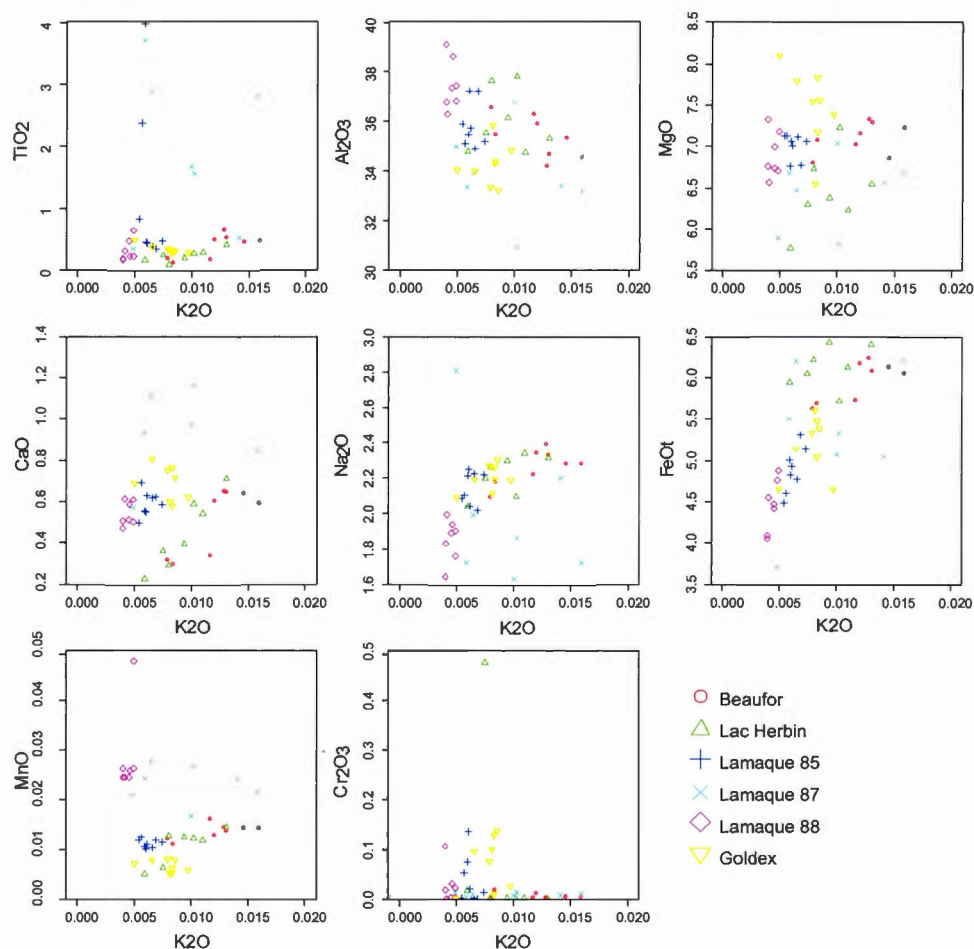


**Figure 3. 13 :** Composition chimique des tourmalines analysées en ppm.  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  en fonction de Ti, Ca, Na, Al, Mn, Cr, et K. Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) et Beaufor

Les tourmalines analysées de mine Lamaque zone Triangle ont une composition plus élevée en  $\text{TiO}_2$  que les autres tourmalines ( $> 2000$  ppm). Celles de Lamaque zone Parallèle ont une composition plus élevée en  $\text{MnO}$  que les autres tourmalines ( $>150$  ppm). Les tourmalines analysées des mines Lac Herbin et Beaufor contiennent une teneur en  $\text{CaO}$  plus basse que celle des mines Lamaque et Goldex. Cette teneur plus faible induit des corrélations positives de  $\text{CaO}$  avec  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ ,  $\text{FeOt}$  et  $\text{K}_2\text{O}$  moins marquées pour ces sites. Cependant la teneur en  $\text{FeOt}$  reste la même.



**Figure 3. 14** : Composition chimique des tourmalines analysées en ppm. FeOt en fonction de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  et  $\text{K}_2\text{O}$ . Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) et Beaufor (10).

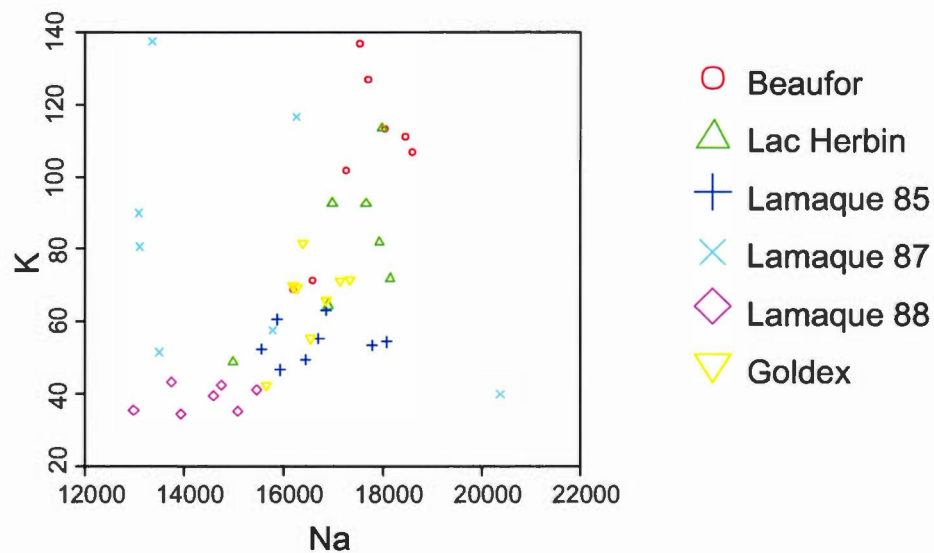


**Figure 3. 15 :** Composition chimique des tourmalines analysées en ppm.  $K_2O$  en fonction de  $TiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $Cr_2O_3$  et  $FeOt$ . Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) et Beaufor (10).

Le rapport  $Na/K$  met en évidence une corrélation positive de ces éléments (Figure 3. 16). Le diagramme associé indique une évolution de la mine Lamaque zone Parallèle pour les plus faibles valeurs, à Lamaque zone Triangle, Goldex, Lac Herbin et Beaufor pour les plus élevées valeurs. Ce rapport indique une substitution de  $Na$  par  $K$  dans le site X des tourmalines. Cette substitution est plus



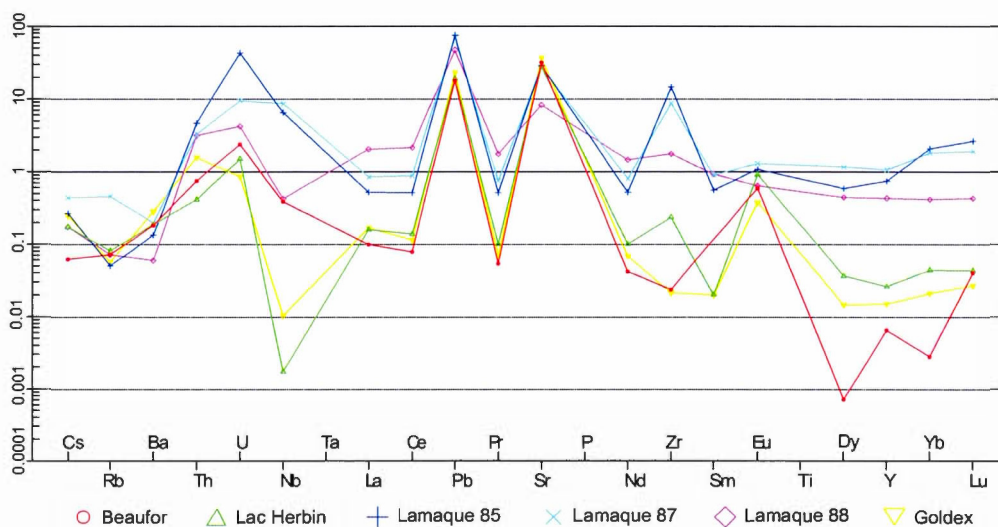
importante dans les tourmalines de Lac Herbin et Beaufor que celles de Lamaque et Goldex. Cela suggère un remplacement préférentiel dans les dravites que dans les schorls.



**Figure 3. 16 :** Composition chimique des tourmalines analysées en ppm. Na en fonction de K. Le rapport Na/K augmente avec la pression. Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) et Beaufor (10).

### 3.2.2.2 Analyses des éléments traces

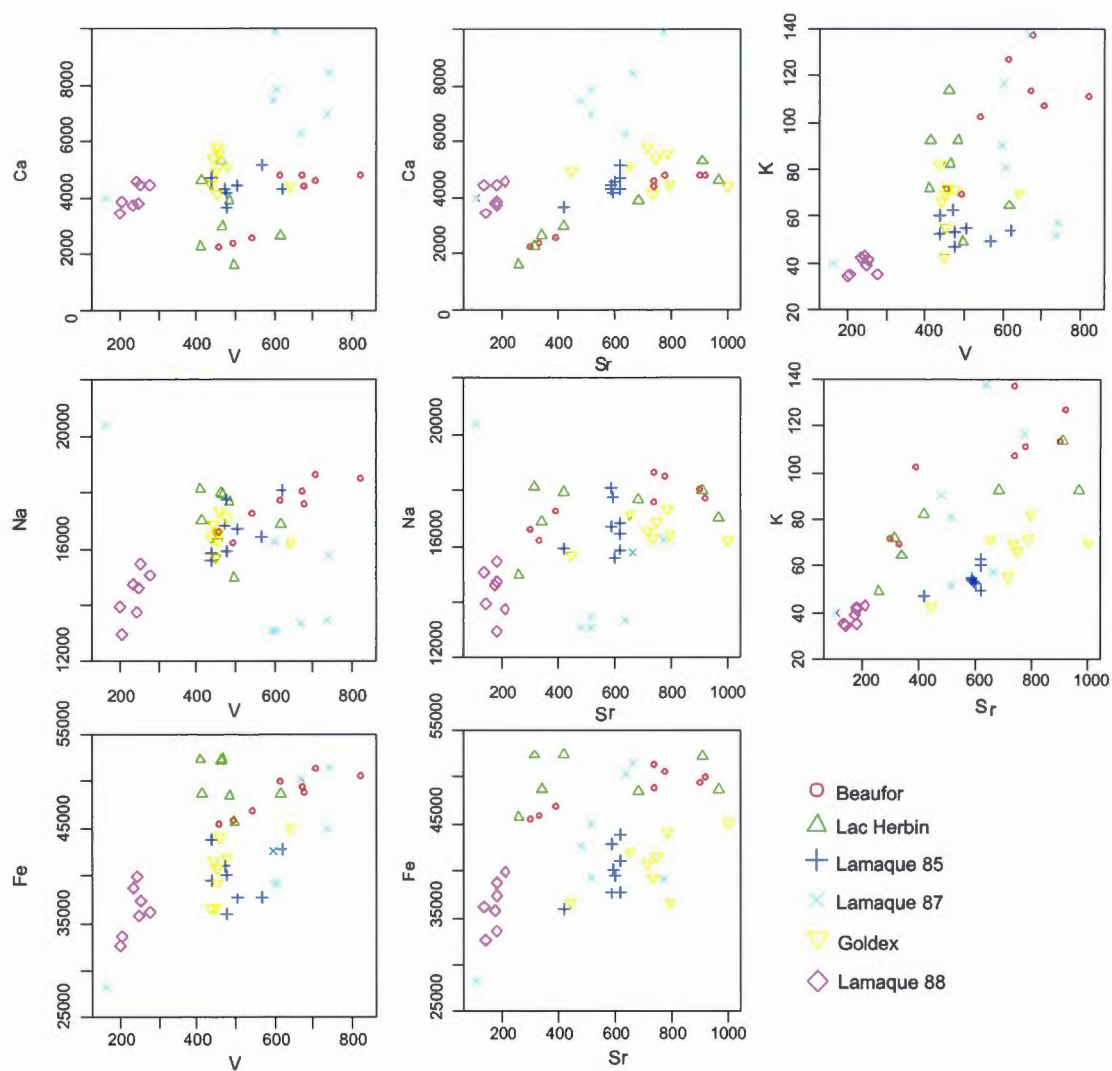
Les tourmalines de Val-d'Or révèlent une composition hétérogène en éléments traces (Figure 3. 17). Les résultats chimiques sont présentés dans l'annexe D et résumés dans le tableau 3. 9. Les concentrations anormalement élevées en certains éléments (e.g. Zn, Sr, Zr, W, Pb, et/ou terres rares) sont probablement dues à la présence de minéraux accessoires soit en micro inclusion dans les tourmalines, soit dans les fractures. Leurs analyses ne sont donc pas représentées dans les diagrammes.



**Figure 3. 17 :** Composition en éléments traces des tourmalines analysées normalisées au manteau primitif (McDonough et Sun 1995). Les mesures sont faites par LA-ICP-MS pour les échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87), Lac Herbin (73) et Beaufor (10).

La normalisation des analyses au manteau primitif de McDonough et Sun (1995) met en évidence une séparation géochimique entre les échantillons de Lamaque et ceux des échantillons de Goldex, Lac Herbin et Beaufor. Au sein de Lamaque, elle sépare également la zone Parallèle de la zone Triangle. Les tourmalines des échantillons de Goldex, Lac Herbin et Beaufor sont appauvries et celle de Lamaque enrichies en éléments trace et terres rares.

Les tourmalines analysées ont des concentrations en V et Sr supérieures à 100 ppm. En fonction de Ca, Na, Fe et K, ces éléments montrent une corrélation positive (Figure 3. 18). Les tourmalines de Lamaque zone Parallèle ont une concentration plus basse en V et Sr que les autres. Les variations de concentration en Na, Ca et Sr peuvent être reliées à la présence ou l'absence de feldspath dans les veines (Van Hinsberg et Schumacher, 2009).



**Figure 3. 18 :** Diagramme binaire de Ca, Na, Fe, K en fonction des éléments mineurs V et Sr.

**Tableau 3. 9 :** Synthèse des concentrations en éléments traces dans les tourmalines du district de Val-d'Or en ppm. Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons de Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) Lac Herbin (73) et Beaufor (10). Var = variation ; Moy = moyenne ; ET= écart type.

| (ppm) | Goldex        |        |       | Lamaque        |        |       |               |        |        | Lac Herbin    |       |        | Beaufor       |        |       |
|-------|---------------|--------|-------|----------------|--------|-------|---------------|--------|--------|---------------|-------|--------|---------------|--------|-------|
|       |               |        |       | Zone Parallèle |        |       | Zone Triangle |        |        |               |       |        |               |        |       |
|       | Var           | Moy    | ET    | Var            | Moy    | ET    | Var           | Moy    | ET     | Var           | Moy   | ET     | Var           | Moy    | ET    |
| Li    | 1,14-2,47     | 1,7    | 0,48  | 3,07-5,94      | 4,85   | 0,97  | 5,45-11,98    | 9,16   | 1,42   | 4,99-6,38     | 5,87  | 0,55   | 3,29-4,16     | 3,67   | 0,28  |
| Be    | 0-4,12        | 0,69   | 1,4   | 0,08-6,23      | 1,76   | 1,88  | 0,28-7,86     | 1,95   | 2,27   | 0,45-2,12     | 0,89  | 0,59   | 0,32-2,83     | 0,92   | 0,87  |
| Sc    | 24,75-56,37   | 40,14  | 11    | 11,20-30,66    | 20,1   | 5,76  | 14,12-101,03  | 50,65  | 23,45  | 30,27-97,46   | 58,42 | 28,17  | 23,78-77,08   | 44,12  | 21,09 |
| V     | 436,38-641,67 | 475,19 | 68,24 | 199,85-274,90  | 238,36 | 26,1  | 163,17-809,94 | 556,64 | 154,79 | 409,04-614,50 | 476,9 | 69,17  | 453,87-827,83 | 623,42 | 121,9 |
| Co    | 0,27-1,23     | 0,71   | 0,36  | 0,27-1,23      | 0,89   | 0,25  | 0,35-36,16    | 12,90  | 13,79  | 15,55-44,48   | 22,12 | 10,35  | 2,20-8,43     | 5,53   | 2,16  |
| Ni    | 91,69-194,25  | 142,97 | 33,21 | 13,92-25,47    | 21,12  | 7,15  | 11,03-71,65   | 31,84  | 16,13  | 42,95-343,84  | 136,3 | 128,81 | 34,97-67,58   | 51,9   | 12,17 |
| Cu    | 1,95-5,84     | 3,13   | 1,36  | 2,44-15,79     | 6,63   | 5,53  | 3,03-6,48     | 4,63   | 16,13  | 3,36-6,62     | 4,65  | 1,28   | 2,39-4,41     | 3,11   | 0,69  |
| Zn    | 89,84-162,66  | 122,4  | 28,73 | 37,69-137,87   | 100,01 | 32,91 | 55,35-550,12  | 274,41 | 199,79 | 57,56-114,10  | 96,13 | 18,27  | 55,69-97,52   | 72,99  | 13,51 |
| Ga    | 43,82-57,39   | 52,34  | 5,02  | 32,77-41,26    | 37,08  | 3,07  | 18,79-45,50   | 32,64  | 9,36   | 32,49-43,29   | 40,08 | 3,75   | 31,58-38,76   | 35,14  | 2,43  |
| Rb    | 0,02-0,05     | 0,03   | 0,01  | 0,02-0,1       | 0,04   | 0,03  | 0,02-0,55     | 0,15   | 0,17   | 0,03-0,06     | 0,05  | 0,01   | 0,017-0,073   | 0,04   | 0,02  |
| Sr    | 443,17-998,42 | 733,75 | 154,7 | 118,01-210,38  | 165,36 | 30,14 | 110,20-772,59 | 565,48 | 148,42 | 261,32-964,46 | 556,5 | 293,39 | 302,41-920,31 | 639,19 | 255,9 |
| Y     | 0-0,24        | 0,06   | 0,08  | 0,10-11,86     | 1,87   | 4,08  | 0-10,86       | 3,92   | 3,55   | 0-0,38        | 0,11  | 0,15   | 0-0,14        | 0,03   | 0,05  |
| Zr    | 0,03-1,17     | 0,22   | 0,39  | 0,09-137,53    | 18,7   | 48,03 | 0,18-579,01   | 123,13 | 145,24 | 0,06-14,77    | 2,49  | 5,44   | 0,006-0,64    | 0,25   | 0,22  |

| Nb | 0-0,01    | 0,01 | 0,01 | 0-2,13     | 0,28 | 0,75 | 0-20,71    | 5,03  | 5,83  | 0-0,008    | 0    | 0    | 0-1,95     | 0,26  | 0,69 |
|----|-----------|------|------|------------|------|------|------------|-------|-------|------------|------|------|------------|-------|------|
| Mo | 0-0,03    | 0,01 | 0,02 | 0-0,57     | 0,11 | 0,2  | 0-0,05     | 0,02  | 0,02  | 0-0,13     | 0,02 | 0,05 | 0-0,04     | 0,007 | 0,01 |
| Ag | 0,02-0,08 | 0,06 | 0,02 | 0,03-0,13  | 0,08 | 0,06 | 0,05-0,23  | 0,12  | 0,05  | 0,03-0,45  | 0,12 | 0,15 | 0,02-0,08  | 0,05  | 0,02 |
| Cd | 0,01-0,19 | 0,1  | 0,06 | 0-0,31     | 0,15 | 0,12 | 0,08-0,44  | 0,25  | 0,21  | 0,09-0,54  | 0,2  | 0,16 | 0,03-0,22  | 0,15  | 0,07 |
| In | 0,03-0,09 | 0,06 | 0,02 | 0,05-0,13  | 0,11 | 0,03 | 0,02-0,06  | 0,04  | 0,01  | 0,06-14    | 0,1  | 0,03 | 0,05-0,09  | 0,07  | 0,01 |
| Sn | 0,40-0,93 | 0,76 | 0,16 | 1,75-2,75  | 2,13 | 0,41 | 0,36-2,29  | 0,94  | 0,53  | 0,62-3,26  | 1,86 | 0,99 | 1,95-3,27  | 2,47  | 0,48 |
| Sb | 0,02-0,16 | 0,07 | 0,05 | 0,03-0,14  | 0,08 | 0,04 | 0,08-3,71  | 0,86  | 0,98  | 0,01-0,13  | 0,08 | 0,04 | 0-0,09     | 0,06  | 0,03 |
| Cs | 0-0,01    | 0,01 | 0    | 0-0,009    | 0    | 0    | 0-0,02     | 0     | 0     | 0-0,01     | 0    | 0    | 0-0,007    | 0     | 0    |
| Ba | 0,56-2,93 | 1,86 | 0,77 | 0-0,8      | 0,4  | 0,33 | 0,39-2,36  | 1,10  | 0,68  | 0,31-3,54  | 1,25 | 1,1  | 0,47-2,03  | 1,2   | 0,56 |
| Hf | 0-0,007   | 0    | 0    | 0-4,07     | 0,54 | 1,43 | 0,04-16,84 | 3,55  | 2,24  | 0-0,26     | 0,05 | 0,1  | 0-0,05     | 0,02  | 0,02 |
| W  | 0-0,1     | 0,03 | 0,03 | 0,008-2,46 | 0,36 | 0,85 | 0-73,01    | 29,19 | 38,45 | 0-0,11     | 0,03 | 0,04 | 0,02-2,58  | 0,4   | 0,89 |
| Au | 0-0,02    | 0,01 | 0,05 | 0,01-0,17  | 0,06 | 0,06 | 0-0,12     | 0,03  | 0,03  | 0-0,12     | 0,02 | 0,06 | 0-0,28     | 0,03  | 0,11 |
| Tl | 0,002-0,1 | 0,01 | 0    | 0,003-0,01 | 0,01 | 0    | 0-0,01     | 0,01  | 0     | 0,004-0,01 | 0,01 | 0    | 0,006-0,01 | 0,01  | 0    |
| Pb | 2,20-4,98 | 3,48 | 0,81 | 3,71-22,24 | 7,12 | 6,17 | 4,07-13,70 | 10,85 | 2,72  | 1,46-5,09  | 2,89 | 1,4  | 1,52-3,16  | 2,7   | 0,79 |
| Bi | 0,04-0,09 | 0,07 | 0,02 | 0,08-0,34  | 0,18 | 0,11 | 0,08-0,23  | 0,19  | 0,06  | 0,13-0,44  | 0,21 | 0,11 | 0,04-0,14  | 0,14  | 0,13 |
| Th | 0-0,78    | 0,13 | 0,27 | 0,005-0,93 | 0,25 | 0,38 | 0-0,73     | 0,31  | 0,37  | 0,006-0,1  | 0,03 | 0,03 | 0-0,33     | 0,06  | 0,12 |
| U  | 0-0,02    | 0,02 | 0,03 | 0,007-0,42 | 0,08 | 0,15 | 0-3,02     | 0,52  | 0,78  | 0-0,14     | 0,03 | 0,05 | 0-0,35     | 0,05  | 0,12 |

La concentration en Li est homogène pour chaque gisements, mais hétérogène entre les gisements, ne dépassant jamais 11 ppm (Figure 3. 19). Les tourmalines de Goldex contiennent moins de 3 ppm de lithium tandis que celles de Lamaque zone Triangle en contiennent plus de 8 ppm. Beaufor, Lac Herbin et Lamaque zone Parallèle contiennent entre 3 et 8 ppm de Li. Le Ni, Sc, Cu et Rb sont en corrélation positive avec Fe/Fe+Mg, alors que le Co, Sn, In, Pb et Ba en corrélation négative avec lui pour tous les échantillons (figure 3. 19).

**Tableau 3. 10 :** Synthèse des concentrations relatives entre les tourmalines des échantillons de Goldex (91), Lamaque (85, 87 et 88), Lac Herbin (73) et Beaufor (10).

| Tourmaline<br>de                        | Concentration relative aux autres échantillons (en<br>ppm) |   |
|---|--|---|
|   | Moins importante   | Plus importante   |
| <b>Goldex</b>                           |  | Ni (80-200) ; Ga (42-60)  |
| <b>Lamaque</b><br>Parallèle<br>Triangle | V (200-25) ; Sc (11-30) ;<br>Sr (118-210)                  | In (0,05-0,13)  |
|   | Ga (18-30) ; Co (0,58-4) ;<br>Ni (16-43) ; In (0,02-0,06)  | Ti (2000-27000) ; Nb (2-23) ; Y<br>(0,5-11) ; Zr (40-600) ; Sb (0-4) ; W<br>(0,10-140) ; Hf (0-17) ; Pb (6-15) ;<br>Li (5-12) ; |
| <b>Lac<br/>Herbin</b> 73                | Zn (57-114) ; Pb (1-5)                                     | Co (15-44) ; In (0,06-14)   |
| <b>Beaufor</b> 10                       | Ne se démarque pas   |   |



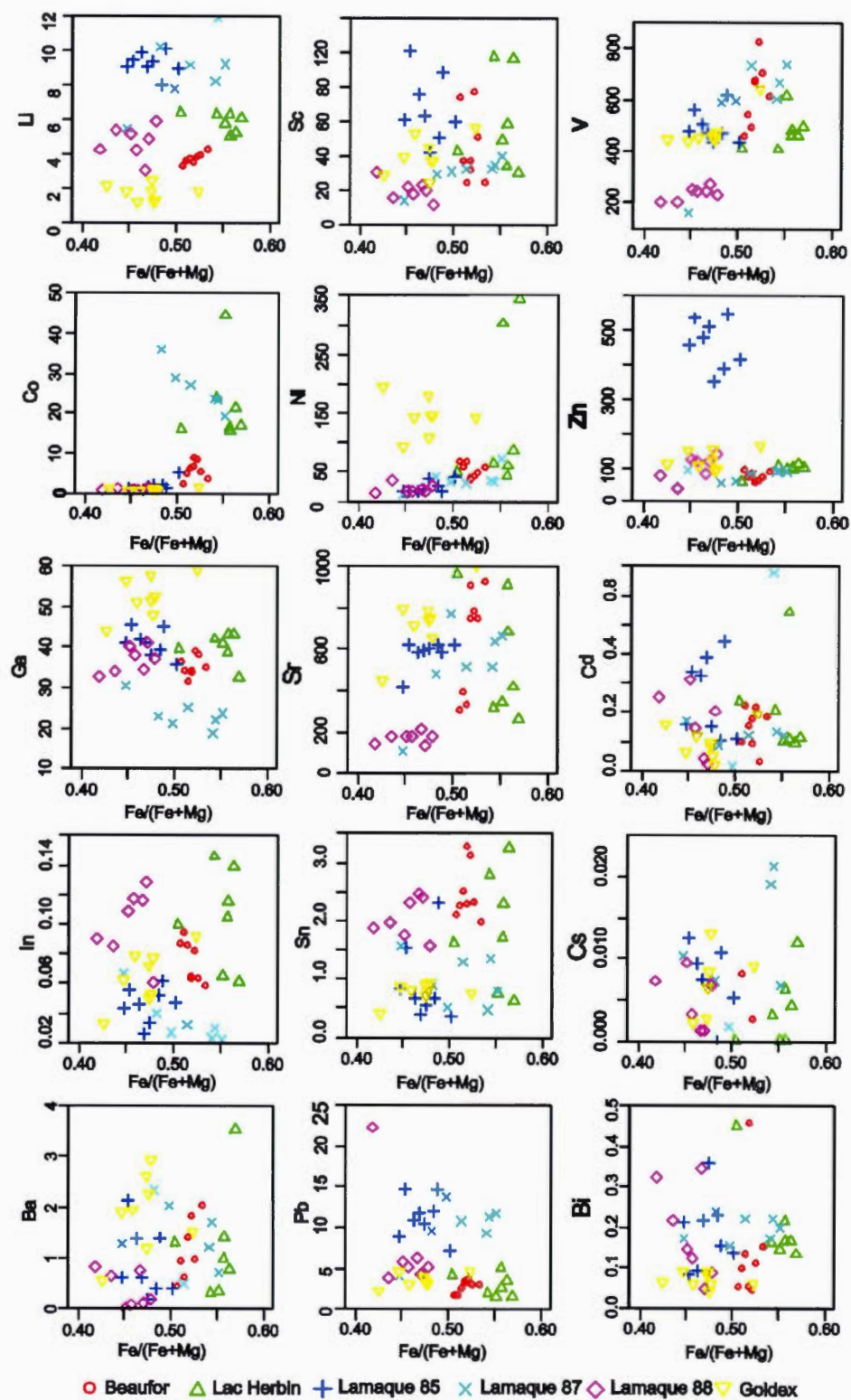
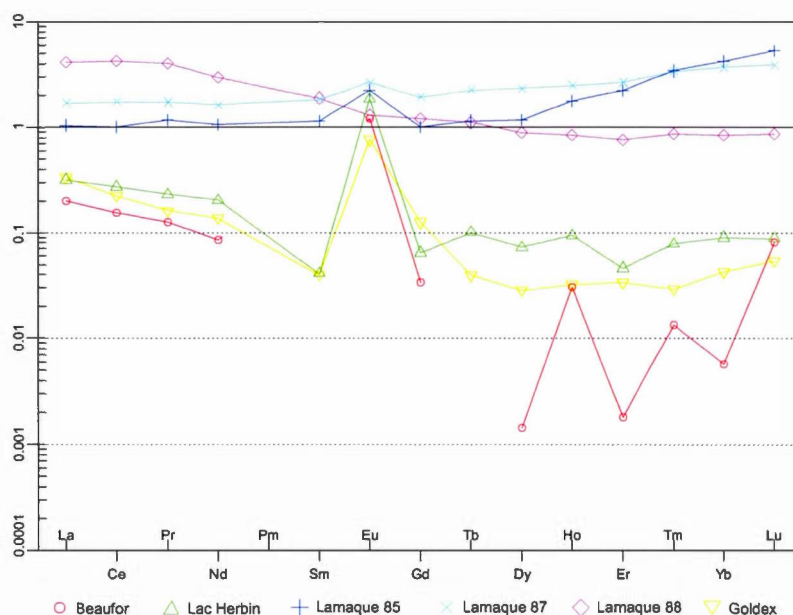


Figure 3. 19 : Diagramme  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  en fonction des éléments traces.

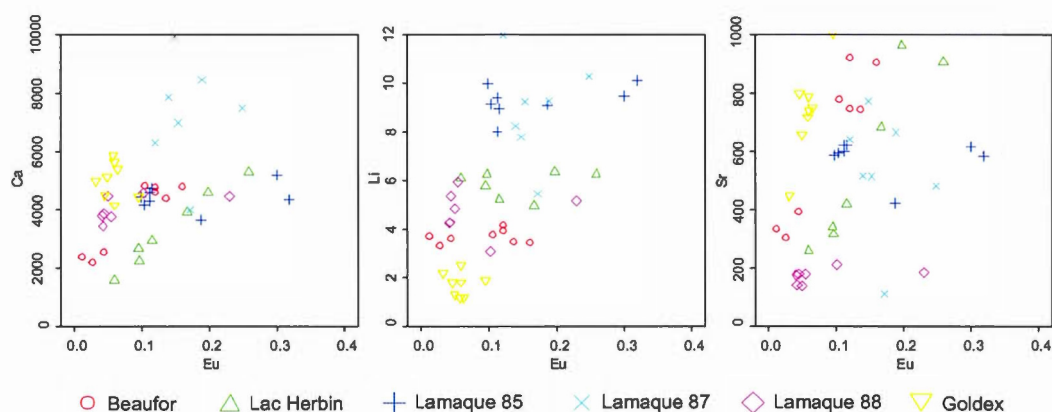
### 3.2.2.3 Analyse des terres rares

La composition en terres rares des tourmalines est hétérogène d'un échantillon à l'autre. Les résultats des analyses par LA-ICP-MS sont présentés dans l'annexe D et résumés dans le tableau 3.11. Les tourmalines de Beaufor présentent un problème analytique avec les terres rares lourdes, à l'exception de Gd, Ho et Lu. Les concentrations des différentes terres rares ne dépassent jamais 15 ppm. Les tourmalines de la mine Lamaque sont plus riches en terres rares que tous les autres gisements (Figure 3.20). Les tourmalines de la zone Triangle sont plus riches en terres rares lourdes et celles de la zone Parallèle en terres rares légères. Les tourmalines de Lamaque correspondent à une composition de chondrite enrichie, à l'exception des terres rares légères pour les tourmalines de la zone Parallèle. Les tourmalines de Goldex, Lac Herbin et Beaufor ont une composition de chondrite appauvrie à l'exception de l'Eu.



**Figure 3. 20 :** Composition en terres rares des tourmalines normalisée au chondrite (Nakamura, 1974) ; échantillons des gisements Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) et Beaufor (10).

Les tourmalines analysées ont toutes un enrichissement en Eu de 0,03 à 0,44 ppm (Figure 3.22). L'anomalie en Eu est un indicateur qualitatif de la condition d'oxydo-réduction du milieu. Les tourmalines ont un grand coefficient de partage pour le  $\text{Eu}^{2+}$  par rapport aux autres terres rares en  $^{3+}$  dont le  $\text{Eu}^{3+}$ . Le  $\text{Eu}^{2+}$  est proche de la taille du Ca et peut le remplacer dans le site X des tourmalines. Ainsi, si l' $\text{Eu}^{2+}$  est disponible dans le fluide ou le magma où la tourmaline croît, elle développera une anomalie positive en Eu. Dans des conditions très oxydées, il n'y a pas de  $\text{Eu}^{2+}$ , mais plutôt  $\text{Eu}^{3+}$  et par conséquent, il n'y a pas d'anomalie qui se développe. S'il y a une anomalie positive en Eu, il s'agit de  $\text{Eu}^{2+}$ , et cela indique que le système n'est pas complètement oxydé sans indiquer le degré d'oxydation (Van Hinsberg, communication personnelle). Les tourmalines de Goldex ont la plus faible anomalie positive de Eu, ce qui pourrait être lié à l'abondance de feldspath, autre porteur de Eu, dans cet échantillon.



**Figure 3. 21 :** Diagramme binaire d'Eu en fonction des éléments traces Ca, Li, Sr

**Tableau 3. 11** : Synthèse des concentrations des terres rares dans les tourmalines du district de Val-d'Or en ppm. Mesures faites par LA-ICP-MS pour les échantillons de Goldex (91), Lamaque zone Parallèle (88), Lamaque zone Triangle (85 et 87) Lac Herbin (73) et Beaufor (10). Var = variation ; Moy = moyenne ; ET= écart type.

| (ppm) | Goldex     |      |      | Lamaque        |      |      |               |      |      | Lac Herbin |      |      | Beaufor   |      |      |
|-------|------------|------|------|----------------|------|------|---------------|------|------|------------|------|------|-----------|------|------|
|       |            |      |      | Zone Parallèle |      |      | Zone Triangle |      |      |            |      |      |           |      |      |
|       | Var        | Moy  | ET   | Var            | Moy  | ET   | Var           | Moy  | ET   | Var        | Moy  | ET   | Var       | Moy  | ET   |
| La    | 0,01-0,21  | 0,11 | 0,06 | 0,05-5,26      | 1,34 | 2,32 | 0,04-2,61     | 0,44 | 0,68 | 0,02-0,17  | 0,1  | 0,06 | 0,01-0,11 | 0,07 | 0,03 |
| Ce    | 0,06-0,21  | 0,19 | 0,1  | 0,10-14,94     | 3,64 | 6,42 | 0,11-6,79     | 1,17 | 1,80 | 0,06-0,44  | 0,23 | 0,13 | 0,02-0,24 | 0,13 | 0,08 |
| Pr    | 0,004-0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,006-1,69     | 0,45 | 0,81 | 0,01-0,78     | 0,16 | 0,22 | 0,001-0,05 | 0,03 | 0,02 | 0-0,02    | 0,01 | 0,01 |
| Nd    | 0,03-0,13  | 0,09 | 0,03 | 0,02-7,13      | 1,85 | 3,26 | 0,06-3,88     | 0,83 | 1,10 | 0-0,28     | 0,13 | 0,11 | 0-0,16    | 0,05 | 0,06 |
| Sm    | 0-0,03     | 0,01 | 0,01 | 0-1,59         | 0,38 | 0,67 | 0-0,88        | 0,29 | 0,34 | 0-0,03     | 0,01 | 0,01 | 0         | 0    | 0    |
| Eu    | 0,03-0,09  | 0,06 | 0,02 | 0,04-0,22      | 0,1  | 0,08 | 0,09-0,44     | 0,18 | 0,09 | 0,05-0,25  | 0,14 | 0,07 | 0-0,15    | 0,09 | 0,05 |
| Gd    | 0-0,11     | 0,03 | 0,04 | 0-1,81         | 0,33 | 0,64 | 0-1,39        | 0,40 | 0,43 | 0-0,05     | 0,02 | 0,02 | 0-0,06    | 0,01 | 0,02 |
| Tb    | 0-0,002    | 0    | 0    | 0-0,26         | 0,05 | 0,1  | 0-0,24        | 0,07 | 0,07 | 0-0,02     | 0    | 0,01 | 0         | 0    | 0    |
| Dy    | 0-0,04     | 0,01 | 0,02 | 0-1,78         | 0,3  | 0,63 | 0-1,83        | 0,59 | 0,59 | 0-0,1      | 0,02 | 0,04 | 0-0,003   | 0    | 0    |
| Ho    | 0-0,009    | 0    | 0    | 0,002-0,36     | 0,06 | 0,13 | 0-0,41        | 0,14 | 0,12 | 0-0,03     | 0,01 | 0,01 | 0-0,007   | 0    | 0    |
| Er    | 0-0,03     | 0,01 | 0,01 | 0-1,05         | 0,17 | 0,36 | 0-1,74        | 0,54 | 0,50 | 0-0,03     | 0,01 | 0,01 | 0-0,003   | 0    | 0    |
| Tm    | 0-0,002    | 0    | 0    | 0-0,16         | 0,03 | 0,06 | 0-0,33        | 0,10 | 0,09 | 0-0,07     | 0    | 0    | 0-0,001   | 0    | 0    |
| Yb    | 0-0,03     | 0,01 | 0,01 | 0-0,15         | 0,18 | 0,39 | 0,02-1,76     | 0,86 | 0,81 | 0-0,07     | 0,02 | 0,03 | 0-0,01    | 0    | 0    |
| Lu    | 0-0,008    | 0    | 0    | 0-0,18         | 0,03 | 0,06 | 0-0,34        | 0,15 | 0,16 | 0-0,01     | 0    | 0,01 | 0-0,01    | 0    | 0    |

#### 3.2.2.4 Analyses isotopiques du Bore

La tourmaline est un minéral clé dans le cycle du bore et représente un de ses réservoirs majeurs dans la croûte (Van Hinsberg, 2011). Les roches crustales représentent un grand réservoir de bore, dû à sa compatibilité avec le magma silicaté. L'eau des océans est également un réservoir de bore avec un temps de résidence de 14 millions d'années (Lemarchand *et al.*, 2000). Le bore s'échappe de l'eau de mer soit lors de son intégration dans les sédiments pélagiques, soit lors des circulations hydrothermales dans la croûte océanique (Van Hinsberg *et al.*, 2011).

Dans les roches ignées, l'enrichissement en bore peut être provoqué par trois processus qui peuvent mener à la formation de tourmaline : (1) lors de la fusion partielle de roche initialement riche en bore ; (2) par la cristallisation fractionnée de magma ou (3) par des circulations de fluides hydrothermaux associés à des magmas silicatés. Les fluides hydrothermaux sont générés durant les étapes tardives de cristallisation magmatique (Marschall et Jiang, 2011). Ils sont enrichis en bore grâce au partitionnement de celui-ci dans les fluides aqueux (magma silicaté) dans des conditions de pression-températures proches du solidus du granite. La concentration et la mobilisation de bore dans les fluides magmatiques hydrothermaux peuvent provoquer l'introduction métasomatique de bore (Marschall et Jiang, 2011).

Dans les environnements métamorphiques, la quantité de bore disponible pour former des tourmalines dépend de la quantité initiale de bore dans la roche et de celle qui peut être libérée (Van Hinberg, 2011). Les roches sont appauvries en bore au plus haut grade métamorphique. Les libérations les plus importantes sont liées à la destabilisation de muscovite et chlorite à basse pression (Leeman et Sisson, 1996). Le changement de l'assemblage minéralogique permet une réorganisation graduelle de la répartition du bore.. Les tourmalines se forment

donc épisodiquement au fur et à mesure que le bore s'extrait des autres phases minérales (Van Hinsberg et Dutrow, 2011).

#### 3.2.2.4.1 Problématique spécifique

La composition isotopique du bore de la tourmaline est quasiment indépendante de la concentration des autres éléments. Il n'existe qu'une faible covariation du  $\delta^{11}\text{B}$  qui augmente avec la diminution de Ti et de  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  (Beaudoin, 2013).

Les études isotopiques faite sur le district minier de Val-d'Or présentent une variation connue en  $\delta^{11}\text{B}$  de -17 à -9 ‰ (Beaudoin, 2013). Les valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  augmentant graduellement d'ouest en est. Cette variation est de même ordre que celle reportée dans d'autres gisements orogéniques dans le monde, comme la variation de -15 à -8 ‰ pour les tourmalines associées à des minéralisations aurifères dans le groupe Serra do Itaberaba au Brésil (Garda *et al.*, 2009). Cependant, cette variation se retrouve également à l'échelle d'un gisement isolé dans le district. En effet, la seule mine Sigma montre une variation de  $\delta^{11}\text{B}$  de -17 à -11 ‰ interprétée comme due à une contribution de sources locales de bore dans les roches crustales (Beaudoin, 2013). Les premières conclusions seraient en faveur de deux sources de bore : une source de  $\delta^{11}\text{B}$  plus légère qui serait issue du métamorphisme de la croûte continentale et une autre moins légère issue du métamorphisme de roches volcano-sédimentaires altérées par l'eau de mer (Garda *et al.*, 2009 ; Beaudoin, 2013).

En complément des données LA-ICP-MS, des analyses isotopiques du  $\delta^{11}\text{B}$  ont été effectuées à la SIMS sur 76 tourmalines issues des six échantillons. La méthodologie est décrite dans le chapitre 2. Les résultats permettent d'obtenir des informations pétrogénétiques sur les tourmalines dans le district.

#### 3.2.2.4.2 Résultats

Les mesures de  $\delta^{11}\text{B}$  des six échantillons étudiés sont compilées dans l'Annexe E et résumées dans le Tableau 3.12. Les tourmalines de Val-d'Or sont

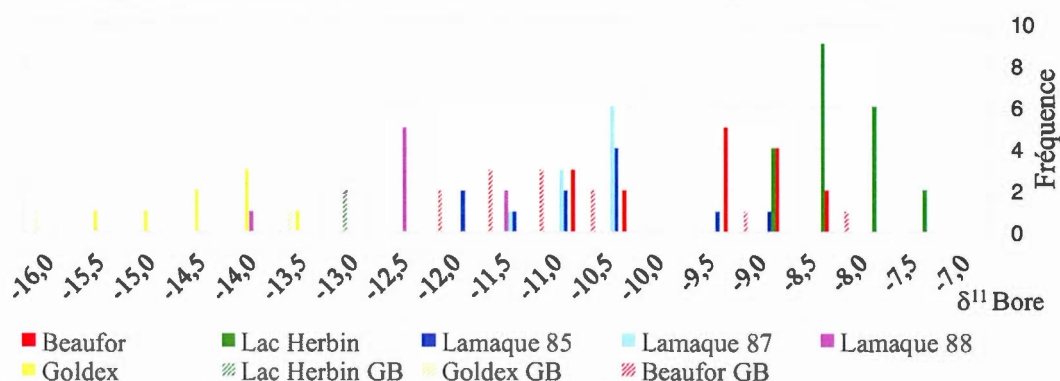


isotopiquement homogènes avec une incertitude de 0,5 ‰. Au sein de chaque localité, la variation de  $\delta^{11}\text{B}$  est faible et la granulométrie n'influe pas sur la composition isotopique. Les valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  des tourmalines varient de -7,7 à -15,6 ‰ et mettent en évidence deux groupes distincts (Figure 3. 23). Les sites Lamaque zone Triangle, Lac Herbin et Beaufor ont une composition isotopique similaire entre -8,9 à -11,7 ‰. Les deux derniers, Goldex et Lamaque zone Parallèle, montrent une composition plus légère de  $\delta^{11}\text{B}$  entre -14,6 et -12,5 ‰.

**Tableau 3. 12 :** Composition moyenne de  $\delta^{11}\text{B}$  des tourmalines des gisements Goldex (91), Lamaque (85, 87 et 88), Lac Herbin (73) et Beaufor (10).

| Site              | Goldex        | Lamaque        |               | Lac Herbin  | Beaufor      |
|-------------------|---------------|----------------|---------------|-------------|--------------|
|                   |               | Zone Parallèle | Zone Triangle |             |              |
| (‰)               | Léger         |                |               | Moins léger |              |
| Moyenne           | -14,6         | -12,5          | -10,9         | -8,5        | -9,9         |
| Écart type        | 0,5           | 0,7            | 1,0           | 0,4         | 0,8          |
| Variation         | -15,6 à -13,9 | -14,0 à -11,6  | -12,4 à -9,1  | -9,2 à -7,7 | -11,2 à -8,9 |
| Nombre d'analyses | 8             | 8              | 20            | 21          | 16           |

Histogramme des valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  Bore des tourmalines des veines de quartz de Val d'Or



### 3.2.2.4.3 Discussion sur l'évolution du bore

La variation en  $\delta^{11}\text{B}$  des tourmalines entre -7,7 à -15,6 ‰ correspond à l'intervalle moyen en  $\delta^{11}\text{B}$  de la croûte continentale ainsi que celui des tourmalines d'origine magmatique et métamorphique (Swihart et Moor, 1989 ; Jiang et al., 2001). La composition étant plutôt légère, il est possible d'exclure les sources de bore lourdes telles que l'eau de mer moderne à + 39,6 ‰ (Foster et al., 2010) et celles liées à la subduction d'une plaque, entre -5 ‰ et 28 ‰ (Marschall et al., 2009 ; Marocchi et al., 2011). L'intervalle est également trop important pour être le résultat d'un gradient de température ou d'une distillation fractionnée du fluide supracrustal (Beaudoin, 2013). Toutefois, cet intervalle est polarisé selon la provenance des échantillons, indiquent ainsi une évolution différente en fonction des sites choisis (Figure 3. 23).

Beaudoin (2013) observe la même variation de  $\delta^{11}\text{B}$  sur les tourmalines de Goldex, Lac Herbin et Beaufor (Figure 3.1) et dans le gisement Sigma, frontalier du gisement Lamaque. Il interprète ces deux regroupements comme le résultat de deux sources de bore : une affectant le district complet et une seconde, locale. Les deux sources potentielles suggérées sont : (1) une source commune au district issu de métamorphisme de roches volcano-sédimentaire altérées par l'eau de mer et (2) une source locale dans les gisements de Lamaque, Sigma et Goldex qui vient se mélanger à la première.

La variation de  $\delta^{11}\text{B}$  mesurée dans le gisement Sigma se retrouve également dans le gisement Lamaque (zones triangle et parallèle) avec une variation de -14 à -9,1 ‰. La proximité de ces deux sites suggère que les deux gisements sont affectés de la même façon par une source locale de  $\delta^{11}\text{B}$  plus léger qui affecterait également Goldex. En revanche, la variation isotopique ne se répète pas avec le  $\delta^{18}\text{O}$  mesuré sur les quartz. Il reste homogène à travers le district et avec la profondeur indiquant un réservoir de bore distinct de celui d'oxygène dans le fluide hydrothermal (Beaudoin et Pitre, 2005).

### 3.3 Les pyrites

#### 3.3.1 Cartographie des pyrites

La méthode de cartographie élémentaire par LA-ICP-MS est un outil performant pour séparer les différentes générations de croissance des pyrites et la chimie des événements hydrothermaux minéralisateurs (Large et al., 2009 ; Zhang et al., 2014). Elle vient compléter les analyses SEM-EDX qui ne permettent pas une résolution aussi fine. La pyrite enregistre la composition géochimique de son environnement lors de sa cristallisation. La cartographie élémentaire permet de mettre en image la variation de composition au sein du minéral.

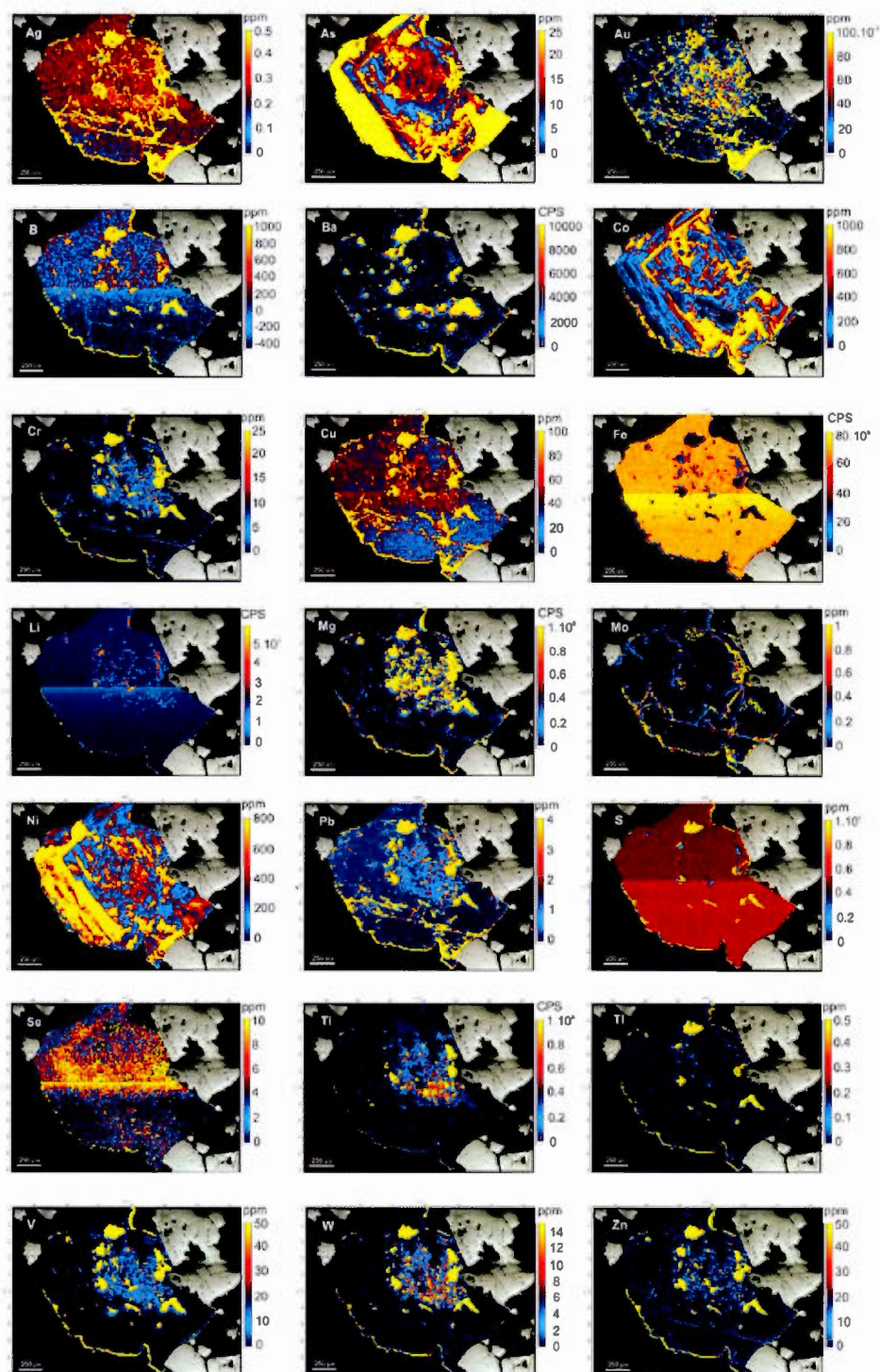
L'analyse a été effectuée sur deux pyrites, préalablement sélectionnées sur des lames minces issues des échantillons de Lac Herbin et Goldex. Les pyrites sélectionnées mesurent entre 500 et 1000  $\mu\text{m}$  et présentent un cœur contenant de nombreuses petites inclusions. La différence de texture nette entre le cœur et le bord de la pyrite suggère un polyphasage. L'échantillon 73 de Lac Herbin a donné deux âges distincts lors de la datation des sulfures avec la méthode Re/Os (communication personnelle, C Sasseville). Les plus grosses pyrites (1 mm) sont plus vieilles (2510 à 2434 Ma) et riches en tungstène tandis que les plus petites sont plus jeunes (< 1511 Ma) et riches en rhenium. Les pyrites de Goldex montrent toutes la même structure avec un cœur poreux et une couronne de recristallisation sans porosité.

Le but de la cartographie des pyrites est d'observer leur composition, leur altération et d'identifier un possible polyphasage. Dans le cas d'un polyphasage, il s'agit d'être capable de distinguer et caractériser ces différentes phases, et ainsi identifier les différentes générations de pyrites. La pyrite enregistre la signature de son environnement de croissance (Large *et al.*, 2009), elle permet donc de connaître la composition des fluides associés. Cette cartographie permet également de localiser l'or et sa phase porteuse. Pendant la cartographie de l'or dans la pyrite, la taille minimum de l'or détectable dépend (1) du rayon de laser ;

(2) de la concentration d'or dans la pyrite et (3) de la pureté de l'or dans les inclusions. La composition des pyrites permettra également d'en savoir plus sur la nature et la source du fluide minéralisateur.

#### 3.3.1.1 Lac Herbin

La pyrite sélectionnée du gisement Lac Herbin mesure 5 x 4 mm. Son contour est irrégulier. Cependant, il est possible d'extrapoler un contour cubique. La pyrite est fracturée avec un cœur contenant de nombreuses petites inclusions (Figure 3. 24). La cartographie met en évidence un polyphasage de la pyrite (Figure 3. 24). La première génération de pyrite se trouve au centre. Elle est riche en éléments Cr, Mg, V, W et Zn. Elle contient de nombreuses petites inclusions, dont de l'or et des minéraux riche en Li et Mg. La première génération de pyrite est entourée d'inclusions de 200 à 250  $\mu\text{m}$  de barytine ( $\text{BaSO}_4$ ) et de tourmaline. Ces inclusions sont le marqueur d'un événement oxydant. La barytine et la tourmaline sont piégées en inclusions entre la première et la deuxième génération de pyrite, formant une interface entre les deux. La cartographie des inclusions remplies par la barytine et la tourmaline indique la présence d'autres éléments en faible concentration (Ag, As, Cr, Cu, Mg, Pb, Tl, V, W, Zn). La seconde pyrite est caractérisée par une forte zonation d'As, Co, Ni et du Se. Elle est entourée par une troisième génération de pyrite. Celle-ci est plus tardive, sans inclusion, et particulièrement riche en As et Ni. Des fractures affectent les trois générations de pyrite et sont riches en Ag, Au, As, Cu, Mo et Pb. Ces métaux sont interprétés comme étant remobilisés des trois générations.



**Figure 3. 23 :** Cartographie LA-ICP-MS d'une pyrite sélectionnée du gisement Lac Herbin. Les cartes sont effectuées pour les éléments suivants : Ag, As, Au, B, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mo, Ni, Pb, S, Se, Ti, Tl, V, W et Zn. L'échelle colorimétrique représente la concentration de chaque élément en ppm. Ces

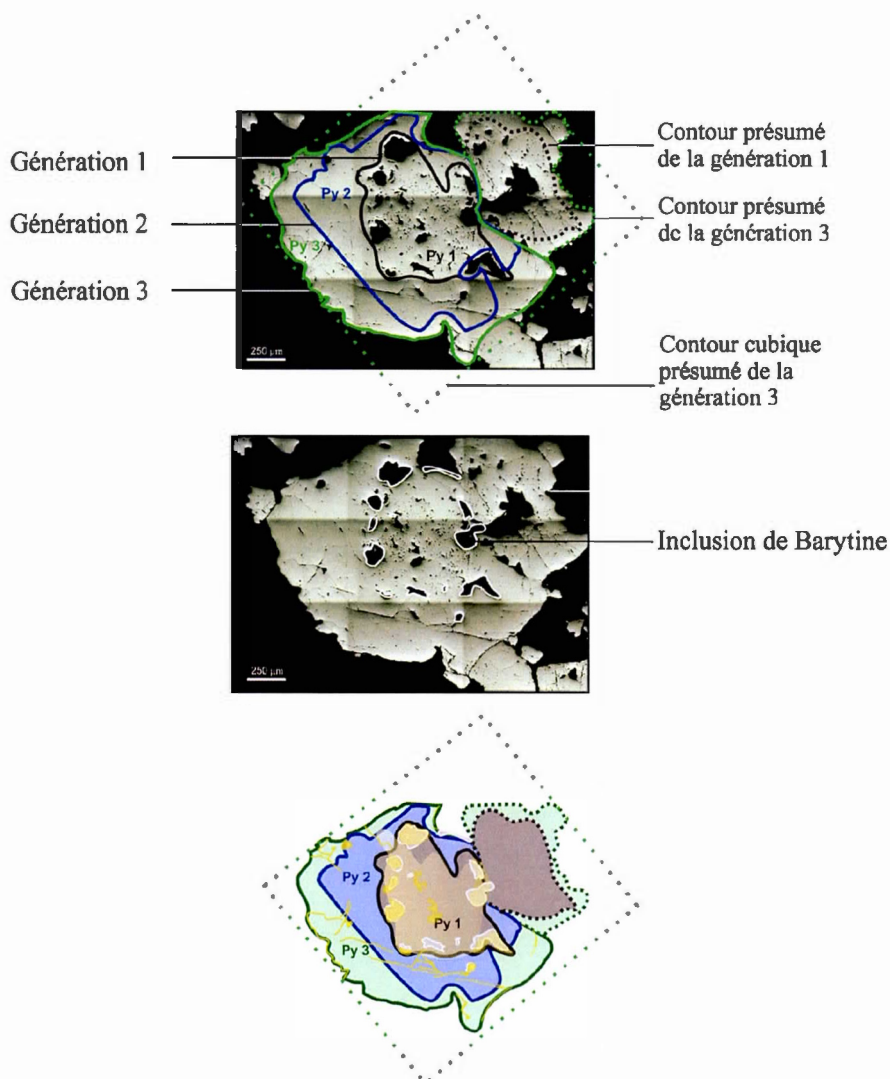


cartographies mettent en évidence trois générations de pyrite et une phase oxydante.

Ces trois générations de pyrite indiquent la présence d'au moins trois fluides sulfurés (Figure 3.25). Un premier pulse hydrothermal dépose l'or dans la pyrite aurifère. Elle est suivie par une phase oxydante cristallisant de la barytine et la tourmaline autour de la pyrite. Un troisième pulse de nouveau sulfuré encapsule la barytine entre la première et la deuxième génération de pyrite. La deuxième génération de pyrite est riche en As, Co, et Ni. Ces éléments, avec le Se, forment des zonations cubiques dans la pyrite. Les concentrations cycliques en As, Co et Ni sont caractéristique des pyrites hydrothermales (Large et al. 2009). Un quatrième fluide tardif vient cristalliser lentement une dernière génération de pyrite massive qui fut possiblement cubique. Des fractures tardives permettent la remobilisation de certains éléments métalliques, dont l'or.

La présence de tourmaline piégée avec la barytine entre les deux générations de pyrite indique que l'arrivée du bore dans le système est liée à la phase oxydante. Ceci donne une bonne indication de la paragenèse des veines. Ainsi, les tourmalines se formeraient durant la phase oxydante, ce qui pourrait également expliquer l'anomalie en  $\text{Eu}^+$  enregistrée par les tourmalines et l'abondance de tourmaline de type dravite dans le gisement de Lac Herbin.

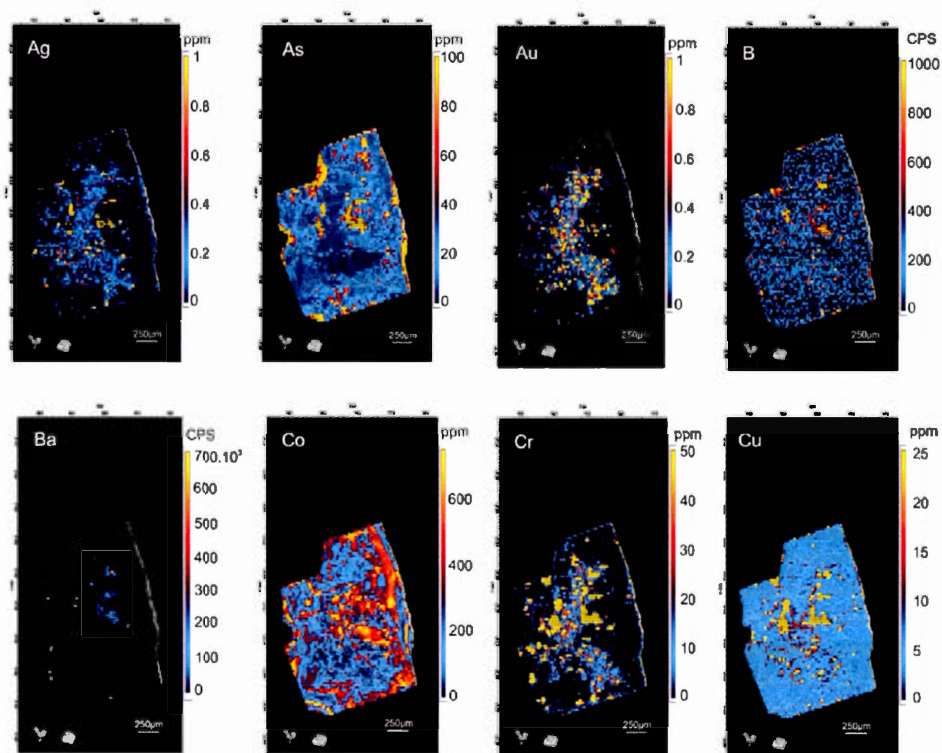


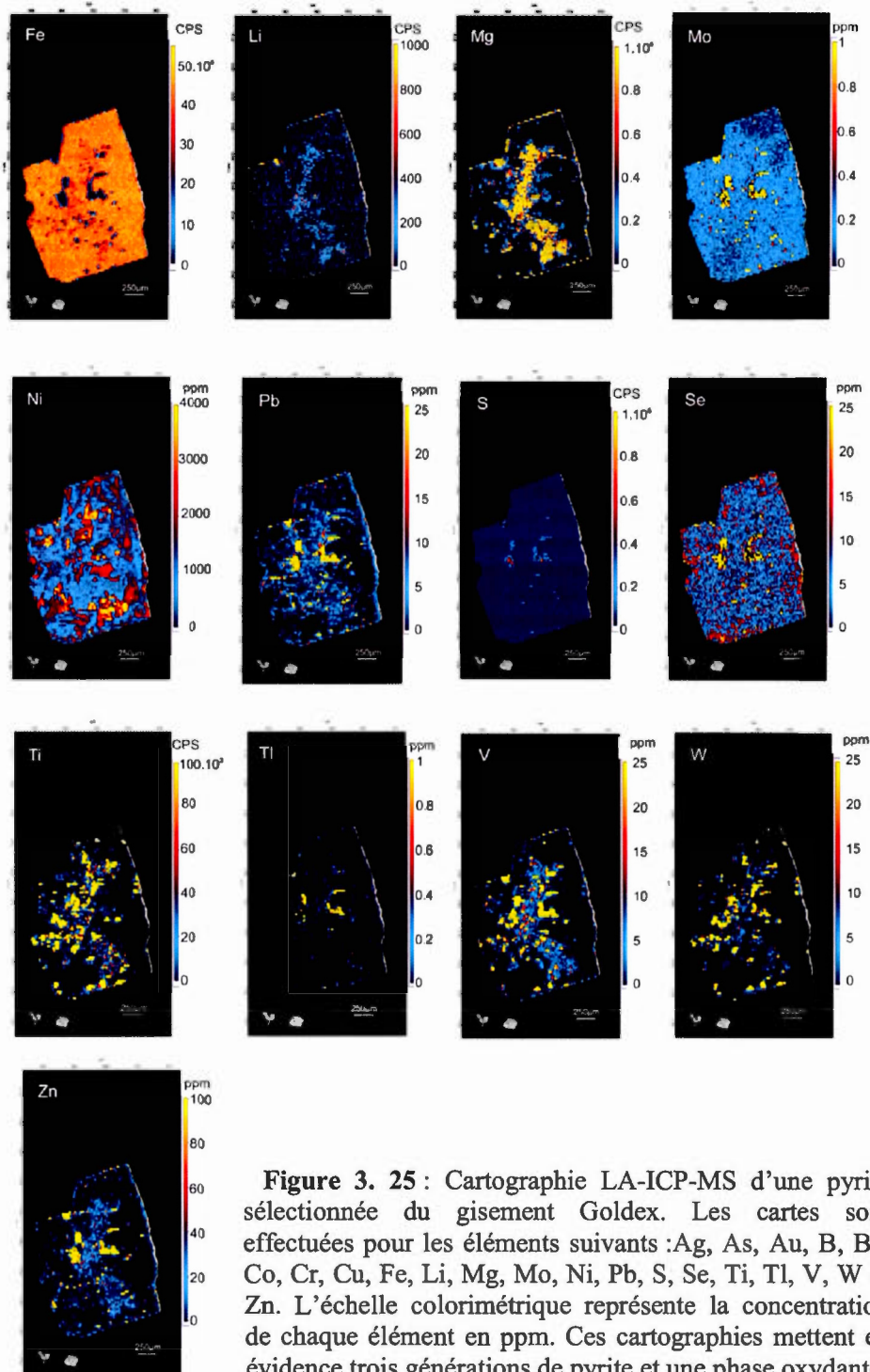


**Figure 3. 24 :** Photographie d'une pyrite du gisement Lac Herbin par LA-ICP-MS. Les lignes représentent les limites des différentes générations de pyrite et les pointillées l'extrapolation de ces pyrites. La couleur noire représente la première génération de pyrite. Elle contient de l'or dans ses inclusions. Le bleu représente les contours de la seconde génération de pyrite fortement zonée en As, Co et Ni. Le vert représente la troisième génération de pyrite, sans inclusion et tardive. Les pointillés rouges représentent le halo de barytine et de tourmaline entourant la première pyrite. Les courbes blanches entourent les inclusions de barytine et tourmaline restantes. Py=pyrite.

### 3.3.1.2 Goldex

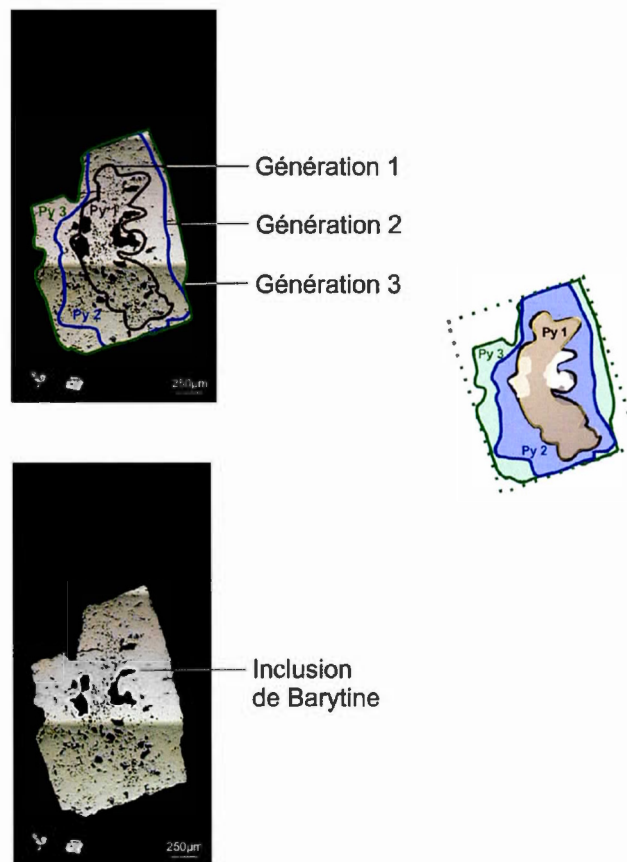
La pyrite sélectionnée du gisement Goldex est cubique avec une altération sur ses bordures. Elle mesure 1 x 1,2 mm. Elle contient beaucoup d'inclusions, mais peu fracturée. La pyrite est analysée avec les mêmes éléments que celle de Lac Herbin. La cartographie met en évidence trois générations de pyrite (Figure 3. 26). La première au centre est riche en Ag, Cr, Li, Mg et contient de nombreuses inclusions. Elle est porteuse d'or. Deux grosses inclusions (250  $\mu$ m) se trouvent à l'interface de la première et la deuxième génération de pyrite. Ce sont des inclusions de barytine et de tourmaline. La deuxième génération de pyrite est tracée avec l'As, le Co, le Ni et le Se. Une dernière génération entoure les deux premières générations de pyrite. Elle est riche en As et Se. Cette dernière génération est très fine, sur les bords de la pyrite avec un faciès cubique.





**Figure 3. 25 :** Cartographie LA-ICP-MS d'une pyrite sélectionnée du gisement Goldex. Les cartes sont effectuées pour les éléments suivants :Ag, As, Au, B, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mo, Ni, Pb, S, Se, Ti, Tl, V, W et Zn. L'échelle colorimétrique représente la concentration de chaque élément en ppm. Ces cartographies mettent en évidence trois générations de pyrite et une phase oxydante.

Ces trois générations indiquent une succession de trois pulses de fluide sulfuré et un pulse oxydant (Figure 3. 27). Un premier pulse cristallise de la pyrite porteuse d'or et d'argent en inclusion. Vient ensuite une phase oxydante qui cristallise des barytines et tourmalines autour de la pyrite aurifère. La deuxième génération reprend le même assemblage que Lac Herbin As, Co, Ni et Se, sans zonation cyclique marquée. La dernière génération de pyrite cristallisée est cubique et riche en As.



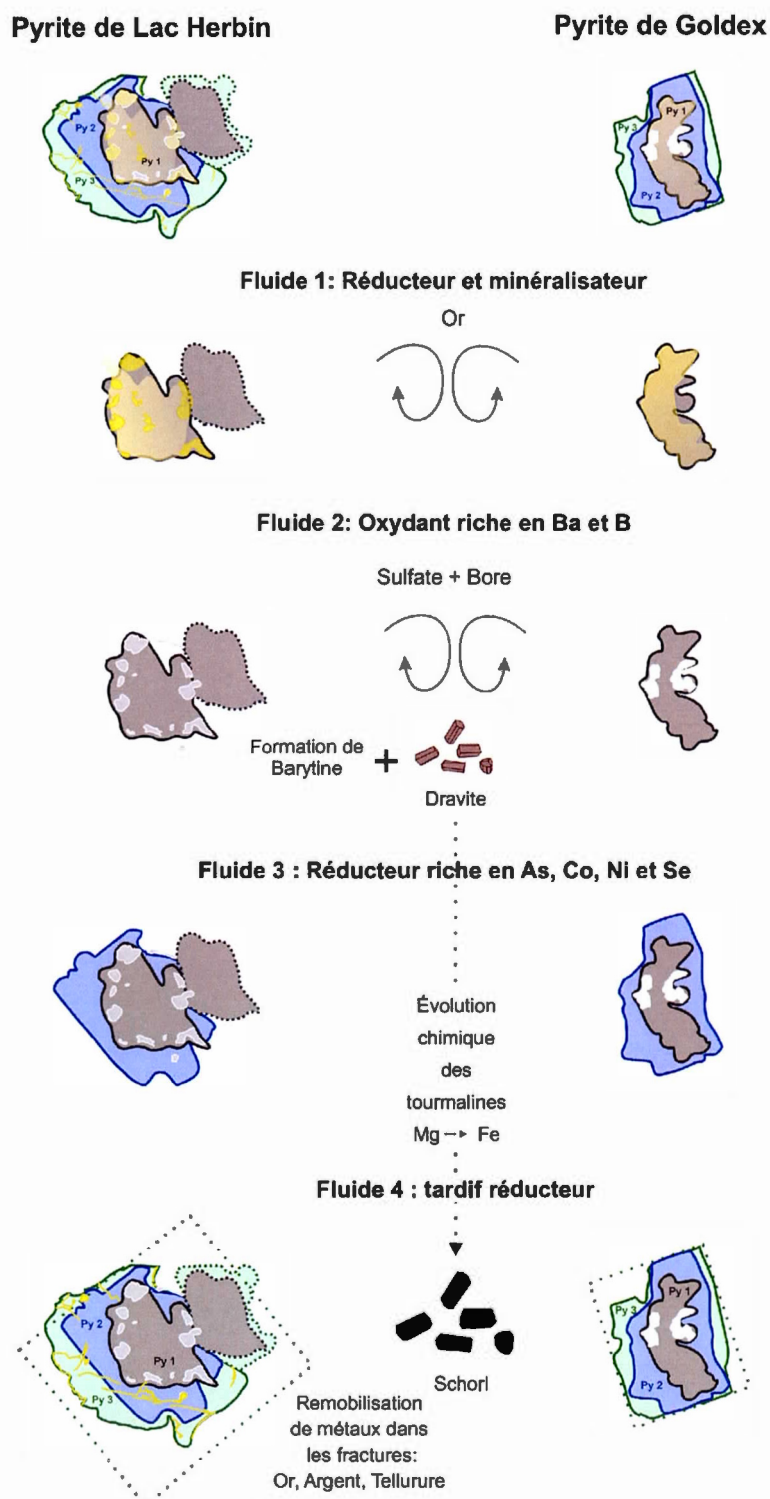
**Figure 3. 26 :** Photographie d'une pyrite du gisement Goldex par LA-ICP-MS. Les lignes représentent les limites des différentes générations de pyrite. La couleur noire représente la première génération de pyrite. Elle est incluse et riche en éléments mafiques. Elle contient de l'or en inclusion. Le bleu représente les contours de la deuxième génération de pyrite en As, Co, Ni et Se. Le vert représente la troisième génération de pyrite, sans inclusion et tardive. Les courbes blanches entourent les inclusions de la phase oxydante à l'interface des deux générations de pyrites. Py=pyrite

### 3.3.2 Synthèse des cartographies de pyrites

La cartographie des pyrites souligne des caractéristiques communes. Elles sont constituées de trois générations (Figure 3. 28). La première est au centre du cristal, avec des contours irréguliers et de nombreuses inclusions. Elle est riche en Cr, Mg, Li et Zn et porteuse d'or dans ses inclusions. À l'interface de la première et la deuxième génération de pyrite se trouvent des inclusions de 200-250  $\mu\text{m}$  de barytine et de tourmaline. La deuxième génération de pyrite est riche en As, Co, Ni et Se. Les concentrations de ces éléments sont cycliques, ce qui est caractéristique des pyrites hydrothermales (Large et al. 2009). La troisième génération est plus tardive et sans inclusion. Elle est riche en As et Se ou Ni. L'or est remobilisé dans les fractures et la porosité.

Les pyrites sont donc hydrothermales, polyphasées et se composent de générations issues de trois événements de fluides hydrothermaux sulfurés dont le premier fut le minéralisateur en or. Entre le premier et le deuxième pulse se produit un événement oxydant. Cet événement permet la formation de barytine et de tourmaline de type dravite autour des pyrites de première génération. Ces minéraux sont par la suite piégés par la deuxième génération de pyrite.





**Figure 3. 27 :** Schéma synthétique de la succession de cristallisation de pyrite et tourmalines dans les veines minéralisées de Lac Herbin et Goldex.



### 3.4 Synthèse des résultats

L'analyse minéralogique et géochimique des échantillons de Goldex, Lamaque zone Triangle et Parallèle, Lac Herbin et Beaufor met en lumière des caractéristiques remettant en cause une partie de l'hypothèse d'une origine commune à tous ces gisements.

Les tourmalines sont de trois types : le schorl (riche en Fe), la uvite (riche en Ca-Mg) et la dravite (en Mg). Elles sont associées à des granulométries et des faciès de pyrite spécifiques :

- le schorl avec les pyrites massives dans les granulométries  $> 250 \mu\text{m}$  ;
- la uvite avec les pyrites pyritohédres dans les granulométries de  $60 - 100 \mu\text{m}$  ;
- la dravite avec les pyrites cubiques dans les granulométries  $< 40 \mu\text{m}$ .

Les pyrites sont de micrométriques à millimétriques avec un polyphasage dont le cœur porte l'or. Les cartographies de pyrite indiquent ainsi une succession de quatre pulses hydrothermaux dans le système du district : trois événements réducteurs et un événement oxydant. Les pyrites se sont formées dans trois contextes hydrothermaux différents. Le premier, saturé en soufre, a cristallisé des pyrites aurifères contenant de nombreuses inclusions. L'or y est soit natif soit associé à de l'argent (électrum). Dans les gisements de Goldex et Lamaque, l'or est aussi associé à des tellures (tellurobismuthite, calavérite, krennerite and tétradymite).

La troisième et la quatrième génération de fluide sont riches en As, Co et Ni. Les pyrites sont moins saturées en soufre. La cristallisation est lente, formant des pyrites cubiques. Ces générations ne sont plus minéralisatrices en or. Après la dernière génération de pyrite, l'or est remobilisé dans les fractures et la porosité de celles-ci. À l'interface de la première et la deuxième génération de pyrite (phase 2) se trouvent des inclusions de  $200-250 \mu\text{m}$  de barytine et de tourmaline de type dravite. Ces minéraux ont cristallisé avec l'arrivée d'un fluide oxydant

riche en bore et sulfates, qui vient interrompre la cristallisation de la première génération de pyrite aurifère.

L'étude géochimique des tourmalines indique une évolution de composition allant de magnésienne (dravite) à ferrifère (schorl) qui l'augmentation de leur taille. Cela suggère une zonation des tourmalines qui commence par cristalliser avec une composition riche en Mg puis continue de cristalliser en changeant de composition. Ce changement de composition est lié aux sulfures et à l'alternance d'une phase oxydante et réductrice. Les pyrites de première génération sont saturées en soufre et le fer est entièrement associé à la pyrite. La tourmaline qui cristallise est alors est riche en Mg (dravite) et en Ca (Uvite) qui est disponible. La deuxième et troisième génération de pyrite et moins saturé en soufre, ce qui rend le fer disponible pour la tourmaline et permet la formation de schorl (zonation extérieur). Le schorl est moins abondant dans les échantillons de Lac Herbin et Beaufor et la dravite dans ceux de Lamaque et Goldex. Cela pourrait être un biais d'échantillonnage dû à la faible quantité d'échantillons ou cela suggère une influence moins grande des événements suivant la formation de dravite.

Les tourmalines ont une composition en éléments majeurs homogènes d'un gisement à l'autre. Cependant, leur composition en éléments traces et terres rares est hétérogène. Cette hétérogénéité sépare les tourmalines de Lamaque de celles de Lac Herbin, Beaufor et Goldex. Les tourmalines de Lamaque sont plus riches en plomb, zirconium et en terres rares, et ont une composition enrichie par rapport au manteau primitif (McDonough et Sun, 1995) et aux chondrites (Nakamura, 1974). Les tourmalines de Lac Herbin, Beaufor et Goldex sont plus riches en nickel et ont une composition plus appauvrie par rapport au manteau primitif (McDonough et Sun, 1995) et aux chondrites (Nakamura, 1974). Le lithium discrimine les gisements les uns des autres avec une concentration plus importante dans les tourmalines de la zone Lamaque et moins importante dans celles de Goldex. L'ensemble des tourmalines analysées montre une anomalie positive en europium et strontium, moins marqué pour les tourmalines du gisement Lamaque. L'euporium est un indicateur de l'état d'oxydoréduction de

l'environnement (Van Hinsberg *et al.*, 2011). Cette anomalie indique un environnement de croissance des tourmalines légèrement oxydé ce qui est confirmé par la présence de barytine dans les pyrites.

Les valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  des tourmalines séparent les gisements du district en deux groupes : un premier avec des valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  légères de -11,2 à -7,7 ‰, affectant l'est du district et un deuxième avec des valeurs plus légères de -15,6 à -9,1 ‰, affectant l'ouest. Les valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  des tourmalines distinguent les gisements de Goldex et Lamaque de ceux de Lac Herbin et Beaufor. Cette distinction peut être due à la différence d'encaissant. Une autre hypothèse est l'apport d'une source locale qui modifierait la signature de bore affectant tout le district.

## **CHAPITRE IV :**

### **DISCUSSION**

L'étude des minéralisations du district de Val-d'Or pose trois questions :

- L'homogénéité du district
- Les relations temporelles entre les phases minéralisées
- Les relations génétiques entre les phases minéralisées

#### **4.1 Les minéralisations sont-elles toutes identiques ?**

Les filons quartz-tourmaline-carbonate (QTC) du district de Val-d'Or ont été regroupés en un même champ filonien par Robert *et al.* (1986 ; 1987 ; 1994) sur la base de leurs caractéristiques hydrothermales et structurales identiques. L'assemblage minéralogique des veines et des zones d'altération associées sont décrits par Robert *et al.* (1986 ; 1987 ; 1994) comme quasi identiques, avec 5-20 % de quartz-tourmaline, des carbonates et de scheelite et de chlorite. La pyrite est le sulfure de fer dominant et peut être accompagnée de chalcopyrite et de pyrrhotite. Il place l'albite comme caractéristique des autres types de veines (non-QTC). Robert (1990 ; 1994) relie la mise en place de ces veines QTC aux failles de troisième ordre avec un événement tardif de la déformation régionale D2 en réponse à un raccourcissement horizontal nord-sud. Ce mouvement aurait refait jouer les failles de deuxième et troisième ordre, permettant la circulation de fluides hydrothermaux (Sibson, 2000).

L'inventaire de l'assemblage minéralogique effectué dans ce travail révèle effectivement un assemblage similaire entre les quatre gisements (Tableau 4.1). Une variation s'observe dans la proportion des minéraux d'un échantillon à l'autre. Les trois types de tourmalines ne sont pas présents dans la même proportion dans le district. La dravite est plus abondante dans les échantillons de Lac Herbin et Beaufor tandis que la schorl, et le feldspath plagioclase, sont plus abondants dans les échantillons de Goldex et Lamaque. Les tourmalines, avec les micas, sont tardives dans l'assemblage. L'assemblage minéralogique sépare donc les échantillons de Goldex et Lamaque de ceux de Lac Herbin et Beaufor.

**Tableau 4. 2 :** Synthèse minéralogique des veines QTC des gisements Goldex, Lamaque, Lac Herbin et Beaufor

|                        |                   | Goldex | Lamaque<br>Parallèle | Lamaque<br>Triangle | Lac Herbin | Beaufor |
|------------------------|-------------------|--------|----------------------|---------------------|------------|---------|
| Faciès de la<br>pyrite | Cubique           | x      | x                    | x                   | x          | x       |
|                        | Intermédiaire     | x      | x                    | x                   | x          |         |
|                        | xénomorphe        |        | x                    | x                   | x          | x       |
| Métaux en<br>inclusion | Or                | x      | x                    | x                   | x          | x       |
|                        | Argent            |        |                      | x                   | x          | x       |
|                        | Electrum          |        |                      | x                   | x          | x       |
| Telluride              | Tellurobismuthite | x      | x                    |                     |            |         |
|                        | Calavérite        |        | x                    | x                   |            |         |
|                        | Krennerite        |        | x                    | x                   |            |         |
|                        | Tetradymite       |        | x                    |                     |            |         |
| Tourmaline             | Schorl            | x      | x                    | x                   | x          | x       |
|                        | Uvite             | x      | x                    | x                   | x          | x       |
|                        | Dravite           | x      | x                    | x                   | x          | x       |
| Sulfure                | Pyrrhotite        |        | x                    | x                   | x          | x       |
|                        | Chalcopyrite      |        | x                    | x                   | x          | x       |
|                        | Molybdénite       |        |                      | x                   |            | x       |
| Quartz                 |                   | x      | x                    | x                   | x          | x       |
| Carbonate              | Calcite           | x      | x                    | x                   | x          | x       |
|                        | Dolomie           | x      | x                    | x                   | x          | x       |
|                        | Scheelite         |        |                      |                     |            | x       |
| Feldspath              | Albite            | x      | x                    | x                   |            |         |
|                        | Microcline        |        |                      | x                   |            | x       |
| Mica                   | Biotite           | x      | x                    |                     | x          | x       |
|                        | Muscovite         | x      | x                    | x                   |            | x       |
| Chlorite               |                   | x      |                      | x                   | x          | x       |
| Rutile                 |                   | x      |                      |                     |            |         |
| Hématite               |                   | x      |                      |                     | x          | x       |
| Phosphate              |                   |        |                      | x                   |            |         |
| Apatite                |                   |        |                      | x                   |            |         |



Le plomb et les tellures sont associés à l'or ou aux pyrites portant l'or dans les veines de Goldex et Lamaque (Tableau 4. 1). Les veines de Goldex et Lamaque ne présentent pas la même teneur d'or. Le gisement Lamaque contient une teneur moyenne de 9 g/t tandis que le gisement Goldex présente une teneur bien plus faible de 1,61 g/t d'or. Les traces de Pb et Te sont plus importantes dans le gisement de Lamaque. Ceci suggère que plus il y a de Te et Pb, plus il y a d'or.

La composition en  $\delta^{11}\text{B}$  n'est pas homogène à travers le district. La distribution de  $\delta^{11}\text{B}$  diminue d'est en ouest. Cette distribution des isotopes du  $\delta^{11}\text{B}$  dans les tourmalines montre également deux groupes : Lac Herbin et Beaufor ont un  $\delta^{11}\text{B}$  de -7,7 ‰ à -11,2 ‰ et Goldex et Lamaque ont un  $\delta^{11}\text{B}$  plus léger de -15,6 ‰ à 9,1 ‰. Ce regroupement est le même que le précédent.

Beaudoin et Pitre (2005) ont analysé d'autres isotopes stables dans les veines du district : C, O et S. La composition en  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  est la même pour les veines QC et QTC. La composition de  $\delta^{18}\text{O}$  des veines QTC indique une distribution régionale avec des valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  plus élevés au centre-sud et descend vers le nord (Beaudoin et Pitre, 2005). La distribution est donc différente de celle du  $\delta^{11}\text{B}$ . Les zonations isotopiques  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  et  $\delta^{34}\text{S}$  suggèrent une influence de la ZTLLC sur le fluide hydrothermal minéralisateur (Beaudoin et Pitre, 2005). De plus, les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{11}\text{B}$  dans les veines QTC de Sigma indiquent qu'il n'y a pas de variation isotopique en fonction de la profondeur pour le quartz et la tourmaline (Beaudoin et Pitre, 2005 ; Olivo *et al.*, 2006 Beaudoin et Chiaradia, 2016). Donc la distribution des isotopes C, O, et S est différente de celle du bore.

Les veines QTC échantillonnées sont toutes mises en place dans un encaissant dioritique ou tonalitique (Lamaque, zone Triangle). La nature même de l'encaissant n'influe donc pas sur la composition des veines. Cependant, les veines QTC de Lac Herbin et Beaufor sont mises en place dans le pluton de Bourlamaque, proches de dykes dioritiques, tandis que les veines QTC de Goldex et Lamaque sont mises en place dans des diorites de plus petite dimension dans des volcanites. Ces caractéristiques pourraient jouer sur la composition de l'assemblage. L'environnement de mise en place quasi identique (diorite à

tonalite) ne paraît influencer la variation minéralogique. Toutefois, les conditions de l'environnement de mise en place ainsi que les conditions de transport des fluides hydrothermaux semblent être responsables des différences de minéralogie d'une veine à l'autre.

#### **4.2 Relations temporelles**

Les veines QTC sont plus jeunes que les veines sans tourmaline du district et n'ont pas subi de déformation (Robert, 1990 ; 1994). Leur âge est contraint entre 2685 Ma, âge de la diorite de Lamaque (Jemielita, 1989), et le début du Protérozoïque avec la mise en place de dykes de diabase qui recoupent ces veines. L'évolution paragenétique du district sera analysée sur la base des études des tourmalines et des pyrites (Tableau 4.2). L'étude des lames minces des différents échantillons indique plusieurs épisodes de mise en place des pyrites et des tourmalines.

Les cartographies chimiques de pyrites mettent en évidence trois générations de pyrites. Le premier fluide hydrothermal des veines QTC permet la cristallisation d'un assemblage à quartz, carbonate et pyrite. La première génération de pyrite est celle qui porte l'or disséminé, natif ou en alliage. Ces pyrites contiennent de nombreuses inclusions. Après la cristallisation de ces pyrites aurifères, se mettent en place des tourmalines et des barytines. Ces minéraux sont les indices de l'arrivée d'un fluide oxydant dans le district. Ce fluide est transporté dans le même réseau que les fluides sulfurés. Après un laps de temps inconnu, une deuxième génération de pyrite se forme autour de la première, piégeant les tourmalines et barytines en contact.

**Tableau 4. 3 :** Paragénèse des Gisements Goldex, Lamaque, Lac Herbin et Beaufor

| Génération de<br>cristallisation de<br>pyrite | Phase<br>réductrice | Phase<br>oxydante | Phase réductrice |   |   |   |
|---|---------------------|-------------------|------------------|---|---|---|
|   | 1                   |                   | 2                | 3 |   |   |
| Or  | I                   |                   |                  |   |   |   |
| Pyrite  | I                   |                   | I                |   | I |   |
| Pyrrhotite                                    |                     |                   | I                |   | I |   |
| Chalcopyrite                                  |                     |                   | I                |   | I |   |
| Molybdénite                                   |                     |                   | I                |   | I |   |
| Tellure                                       | I                   |                   |                  |   |   |   |
| Quartz  | I                   |                   | I                | I | I | I |
| Carbonate                                     | I                   |                   | I                |   | I |   |
| Barytine                                      |                     | I                 |                  |   |   |   |
| Tourmaline                                    |                     | I                 |                  | I | I | I |
| Biotite                                       |                     |                   |                  | I |   | I |
| Muscovite                                     |                     |                   |                  |   |   | I |
| Feldspath                                     |                     |                   |                  | I |   | I |
| Chlorite                                      |                     |                   |                  |   |   | I |
| Rutile  |                     |                   |                  |   |   | I |
| Hématite                                      |                     |                   |                  |   |   | I |

Cette deuxième génération de pyrite se cristallise en zonation cyclique riche en As, Co, Ni et Se suggérant une phase de minéralisation plus lente et moins saturée en soufre que la première (Murowchick et Barnes, 1987). L'apport d'As se fait après la phase oxydante, ce qui pourrait indiquer un apport sédimentaire dans le fluide hydrothermal. La dernière génération de pyrite qui se forme est une pyrite cubique riche en As moins saturé en soufre. L'absence d'inclusions entre la deuxième et troisième génération de pyrite suggère une continuité dans la minéralisation et une modification des conditions chimiques de formation. Le feldspath, la chlorite, les micas et d'autres sulfures (pyrrhotite, chalcopyrite et

molybdénite) cristallisent simultanément avec et après la deuxième et la troisième phase de pyrite. Les dernières tourmalines se forment avec de la muscovite après la troisième génération de pyrite et certaines seront en contact avec de l'or natif remobilisé dans la veine. Elles sont tardives avec le rutile, le sphène, la scheelite, la tourmaline et le mica. Les tourmalines évoluent d'une composition riche en Mg à riche Fe parallèlement à la désaturation en soufre des pyrites avec le retour de la phase réductrice.

Les datations de minéraux tardifs, tels que le rutile, le sphène, la scheelite et le mica, dans les veines QTC donnent des âges entre 2630 et 2579 Ma (Kerrick et King, 1993). Ces datations ne permettent pas de dater le changement d'état du fluide de réducteur à oxydant qui permet la formation de barytine et de tourmaline magnésiennes dans les veines.

L'évolution temporelle montre la présence de quatre étapes dans la formation des gisements :

- Une étape à pyrite aurifère riche en inclusion, traduisant un contexte réducteur,
- Une étape à sulfates et tourmaline magnésienne, traduisant un contexte oxydant,
- Deux étapes à pyrite non aurifère et des tourmaline ferrière pour un retour à un contexte réducteur.

### 4.3 Comparaisons

L'évolution du système de Val d'Or montre une évolution des tourmalines de magnésien à ferrière. Cette évolution a été observée dans plusieurs autres district : dans l'amas sulfuré de Kidd Creek (Ontario) (Slack et Coad, 1989), dans le gisement IOCG de Dahongshan (Chine) (Su *et al.*, 2016), dans le granite à étain de Hnilec en Slovaquie (Jiang *et al.*, 2008).

Slack et Coad (1989) ont étudié les tourmalines de l'amas sulfuré volcanogène de Kidd Creek, en Ontario. Ils interprètent la variation de composition depuis des schorls vers les dravites comme enregistrant en grande partie le mélange entre les fluides hydrothermaux riches en fer présent dans la partie supérieure de la croûte océanique avec de l'eau marine riche en Mg.

Ainsi, les tourmalines riches en Mg pourraient refléter la présence d'eau de mer dans la genèse des minéralisations en or. Cependant, les valeurs des  $\delta^{11}\text{B}$  des tourmalines archéennes du district sont beaucoup plus faibles de celles des  $\delta^{11}\text{B}$  des tourmalines associées à l'eau de mer moderne. La variation de la chimie des tourmalines de dravite à schorl pourrait être contrôlée par le temps : les dravites arriveraient avec la phase oxydante, puis évolueraient vers une composition plus riche en fer, des schorls, correspondant au retour d'un état réduit du système. La dernière génération de tourmaline s'accompagne de muscovite, suggérant l'apport d'une autre source de bore, ce qui expliquerait également le changement de composition chimique de la tourmaline.

Le changement d'état de réducteur à oxydant est également observé dans d'autres gisements avec un changement de chimie des tourmalines de schorl à dravite. Le gisement de type IOCG de Dahongshan (Chine) est associé à des intrusions subvolcaniques paléoprotozoïques tardives (Su *et al.*, 2016). L'évolution des tourmalines, de schorlitique à dravitiques, formées durant les quatre phases de minéralisation et d'altération du Dahongshan permet de suivre l'évolution du fluide. Chaque phase de minéralisation indique une valeur différente  $\delta^{11}\text{B}$  dans les tourmalines. La première phase est une altération sodique préminéralisation avec une valeur de  $\delta^{11}\text{B}$  de -14,7 ‰ à -5,7 ‰. La deuxième représente la minéralisation des oxydes de fer avec une valeur de  $\delta^{11}\text{B}$  de -11,6 ‰ à -6,1 ‰. La troisième phase permet la minéralisation des sulfures avec une valeur de  $\delta^{11}\text{B}$  -4,4 ‰ à -0,6 ‰. La dernière phase met en place des veines quartz-carbonates tardives avec une valeur de  $\delta^{11}\text{B}$  de +2,9 ‰ à + 5,9 ‰. Cette variation de  $\delta^{11}\text{B}$  indique le mélange d'au moins deux sources de bore différentes : une source magmatique (1 et 2) et une source marine externe (3 et 4) avec une valeur de  $\delta^{11}\text{B}$  positive pour l'eau salée. Su *et al.* (2016) suggèrent que la minéralisation IOCG

peut être initialement dérivée d'une source magmatique, mais que les fluides non magmatiques ou le mélange des fluides peuvent être vitaux pour déclencher la minéralisation économique des sulfures.

Le granite à étain de Hnilec en Slovaquie présente également un changement d'état du système avec une évolution de dravite à schorl (Jiang *et al.*, 2008). Les tourmalines y sont présentes en veine, en agrégat ou disséminées. Elles sont formées durant une phase précoce majeure. Les tourmalines de la phase précoce ont un  $\delta^{11}\text{B}$  de -10,3 ‰ à -15,4 ‰ et une origine magmatique reliée au granite de Hnilec (Jiang *et al.*, 2008). Les tourmalines tardives ont une composition chimique plus variée avec plus de Mg et moins d'Al. Elles ont un  $\delta^{11}\text{B}$  de -16,0 ‰ à -17,1 ‰, plus faible que celles de la phase précoce, et une origine liée à des fluides hydrothermaux d'origine métamorphique. D'une phase à l'autre, la composition en  $\text{Fe}^{3+}$  augmente suggérant un changement d'état de réducteur à un milieu plus oxydé dont l'origine est un fluide métamorphique. Jiang *et al.* (2008) suggèrent que ce changement d'état est le déclencheur de la minéralisation d'étain.

Su *et al.* (2016) et Jiang *et al.* (2008) décrivent des changements d'état de réducteur à oxydant avec des tourmalines déjà formées. Dans le cas du gisement filonien de Val-d'Or, le changement d'état de réducteur à oxydant est postérieur à la minéralisation en or, et n'a donc pas de lien avec le dépôt aurifère. Les tourmalines sont liées à la phase oxydante et ne sont pas présentes lors de la phase réductrice minéralisatrice. De plus, elles ne sont pas liées à la minéralisation du gisement. Cependant, les tourmalines de type dravite correspondent avec l'arrivée d'une source marine externe comme suspectée pour la phase oxydante de Val-d'Or (Beaudoin et Pitre, 2005), bien qu'il ne puisse s'agir d'eau de mer moderne ( $\delta^{11}\text{B}$  trop élevés).



#### 4.4 Interprétations génétiques

L'assemblage minéralogique des filons QTC se met en place lors de différentes phases séparées dans le temps. Ces phases arrivent avec de nouveaux apports qui sont enregistrés par la tourmaline et la pyrite. C'est notamment le cas du bore qui débute la cristallisation de tourmaline et de l'arsenic qui est enregistré dans les pyrites de deuxième et troisième génération.

La minéralisation se fait avec la première génération de pyrite, qui est riche en inclusions. Le fluide qui les cristallise est saturé en soufre et la cristallisation est rapide. La teneur en or est hétérogène à travers le district, le maximum étant atteint à Lamaque avec 7,4 g/t d'or. Les pyrites des gisements de Goldex et Lamaque contiennent du plomb et du tellure. Plus la concentration en plomb et tellure augmente, plus la teneur en or est importante. Ces éléments pourraient suggérer la présence d'un fluide chloruré tardif favorisant la minéralisation.

Le bore arrive dans le système avec le deuxième fluide, après la phase de pyrite aurifère. Cet apport permet le début de cristallisation des tourmalines. Les tourmalines vont continuer à cristalliser jusqu'après la dernière cristallisation de pyrite d'abord riche en Mg puis riche en Fe. Les dernières tourmalines cristallisent avec de la muscovite, autre minérale réservoir de bore. La valeur de  $\delta^{11}\text{B}$  est légère dans le district puisqu'elle varie de -7,7 ‰ à -15,6 ‰. Cet intervalle rejette une origine liée à de l'eau de mer moderne qui a une valeur de  $\delta^{11}\text{B}$  plus élevée ( $\geq +39,6$  ‰). La variation de  $\delta^{11}\text{B}$  dans le district correspond au changement de type de tourmaline du pôle Fe (schorl) au pôle Mg (dravite). Cette disparité suggère que le fluide oxydant n'est pas distribué de manière homogène dans le district. Les résultats d'analyses d'isotopes du bore sont concordants avec ceux de Beaudoin (2013). Ils indiquent une diminution en  $\delta^{11}\text{B}$  de l'est vers l'ouest entre -7,7 ‰ et -15,6 ‰, avec une séparation des gisements de Lac Herbin et Beaufor (-7,7 à 11,2 ‰) de ceux de Goldex et Lamaque (-9,1 ‰ à 15,6 ‰).

Beaudoin et Pitre (2005) proposent que les fluides hydrothermaux dans les failles de deuxième et troisième ordre se mélangent avec un autre fluide supercrustal. Ils suggèrent une eau marine archéenne évoluée, piégée dans la porosité, et les

fractures des roches volcaniques et plutoniques (Beaudoin et Pitre, 2005). L'eau marine archéenne pourrait être le déclencheur changeant l'état du fluide de réducteur à oxydant et réservoir de bore, plutôt que l'apport d'une composante métasédimentaire issue des roches du Groupe du Pontiac ou de roches semblables, enfouies sous l'Abitibi (McCuaind et Kerrich, 1998 ; Kerrich et Ludden, 2000). Cette eau de mer archéenne serait alors légèrement magnésienne et sulfatée, permettant la formation de tourmaline et de barytine. Son impact n'est pas le même sur tout le district puisque cette eau de mer archéenne est piégée dans les roches encaissantes, les volcanites. Cette interaction ne se serait faite qu'après le premier événement de fluide hydrothermal permettant la minéralisation aurifère. La cristallisation de muscovite tardivement dans l'assemblage avec des tourmalines pourrait également suggérer un nouvel apport de bore. Un nouvel apport pourrait également expliquer le changement de type de tourmaline vers la fin du système.

La concentration en As des pyrites suggère également une faible salinité dans la composition du fluide (Kerrich *et al.*, 1983), ce qui pourrait être lié à l'arrivée de la phase oxydante. La phase oxydante ne joue cependant pas de rôle dans la minéralisation puisqu'elle est postérieure à la première génération de pyrite aurifère. La cristallisation des pyrites de deuxièmes et troisièmes générations est différente de la première génération. La cristallisation est plus lente et cubique dans un système moins saturé en soufre et plus riche en As, Co, Ni et Se. La phase oxydante a donc complètement modifié le système original.

Les filons QTC auraient donc eu un minimum de deux apports supplémentaires après la minéralisation.

La paragenèse des gisements serait représentée par trois étapes :

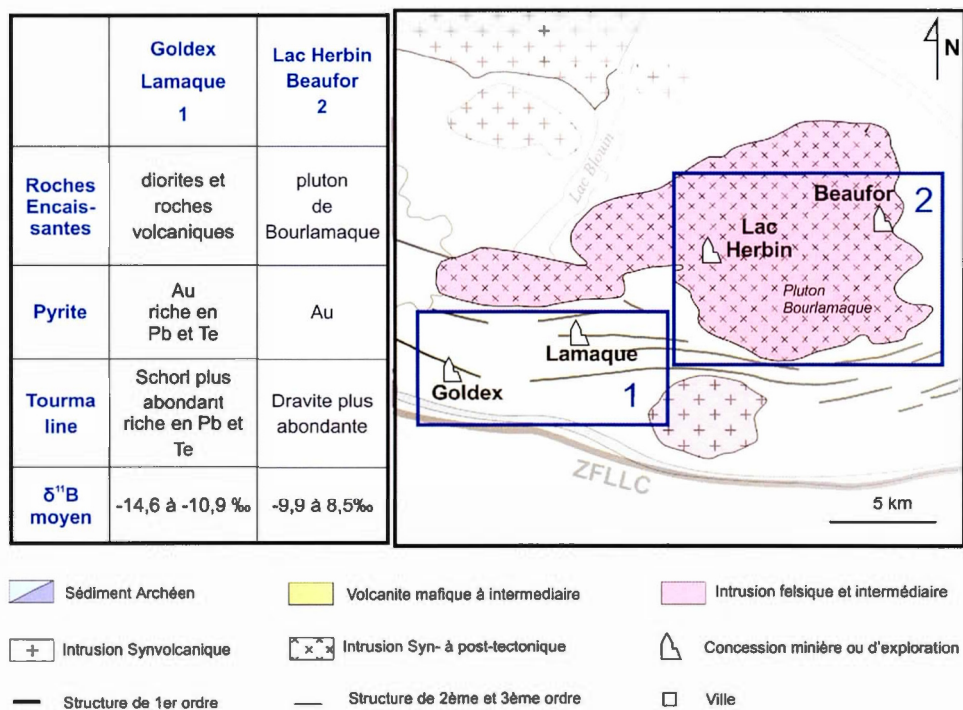
- La première étape correspond à la formation de veines de quartz, carbonate et pyrite aurifère.

Ces veines ont une origine commune avec les veines QC (Neumayer et Hagemann, 2002 ; Beaudoin et Pitre, 2005). L'origine est un fluide

métamorphique profond venant d'une région similaire pour les veines QC et QTC. Cette origine commune se reflète dans la similarité des isotopes de C, O et S (Beaudoin et Pitre, 2005). Beaudoin et Pitre (2005) proposent que chaque champ filonien soit le résultat de courts événements d'accrétion tectonique comme c'est le cas dans la ceinture d'or de Juneau en Alaska (Goldfarb et al., 1991). Cette phase correspond à un modèle d'or orogénique.

- La deuxième étape, après un laps de temps indéterminé, lorsque les fluides métamorphiques profonds interagissent avec un fluide supracrustal composé d'eau de mer archéenne évoluée, piégée dans les porosités et les fractures des roches volcaniques et plutoniques (Beaudoin et Pitre, 2005). Cette eau, sulfatée et magnésienne, oxyde le système. Elle permet la cristallisation de barytine et de tourmaline de type dravite, riche en Mg, dans les veines.
- Enfin, après un laps de temps indéterminé, la troisième étape suit avec la formation de pyrite arsénicale. Le système n'est plus saturé en soufre et est riche en As et Fe. La cristallisation est lente, formant des pyrites cubiques non aurifères et des tourmalines de type schorl. Le système retourne vers un état réducteur. Les pyrites de troisième génération sont moins riches en Co, Ni et Se que la deuxième génération.

La phase 1 correspond à un modèle orogénique, alors que la phase 2 représenterait un événement local qui n'est pas encore contraint. Cette phase oxydante a pu soit être un événement bref soit un changement régional de plusieurs millions d'années. La phase 3 et 4 sont un retour à l'état réducteur sans pouvoir retrouver les conditions de la phase 1.



**Figure 4. 1 :** Synthèse des principales caractéristiques des gisements étudiés

## CONCLUSION

L'analyse des pyrites et des tourmalines apporte de nouvelles informations sur la géochimie et la chronologie des phases minéralisées des gisements orogéniques archéens du district de Val-d'Or. L'originalité de ce mémoire est l'utilisation d'une méthodologie permettant la récupération de matériel entier. Il est ainsi possible d'observer des minéraux automorphes et de pouvoir les classer en fonction de leur taille. Cependant, le nombre d'échantillons sélectionnés pour l'étude reste faible. Un plus grand nombre aurait permis une meilleure robustesse statistique des résultats obtenus.

Les résultats de cette étude vont dans le sens du modèle de référence de Robert (1994) tout en le précisant. Comme Robert (1994) l'a décrit, l'ensemble des gisements qui compose le champ filonien quartz-tourmaline-carbonate est issu de la même paragenèse. Cependant, ils ne sont pas tous affectés de la même façon par les quatre étapes majeures qui la composent. Dans les filons quartz-tourmaline-carbonate, l'or est lié à la première génération de pyrite. La tourmaline cristallise après la minéralisation aurifère et évolue d'une composition magnésienne à ferrière avec la désaturation en soufre des pyrites qui rend disponible le fer pour les tourmalines. Les pyrites de deuxième et troisième génération sont riches en arsenic mais ne sont pas aurifères.

Les analyses géochimiques des tourmalines du district révèlent une hétérogénéité à travers les gisements, séparant les gisements de Goldex et Lamaque de ceux de Lac Herbin et Beaufor. Ces deux groupes représentent deux différents environnements de mise en place pour les veines. Les gisements de Goldex et Lamaque sont mis en place dans des intrusions dioritiques locales dans les volcanites. Les tourmalines de ces veines sont majoritairement du schorl et les pyrites qu'ils contiennent sont riches en Pb et Te, dont la proportion augmente

avec celle d'or. Les gisements Lac Herbin et Beaufor sont mis en place dans le pluton de Bourlamaque et la dravite y est abondante. Les tourmalines analysées du district sont également divisées dans ces deux groupes avec des valeurs de  $\delta^{11}\text{B}$  plus légères à Goldex et Lamaque ( $\delta^{11}\text{B}$  moyen de -15,6 ‰ à -9,1 ‰), qu'aux gisements de Lac Herbin et Beaufor ( $\delta^{11}\text{B}$  moyen de -11,2 ‰ à -7,7 ‰).

Les cartographies élémentaires des pyrites permettent de comprendre la chronologie des différentes phases minérales des filons QTC. Les pyrites polyphasées indiquent une évolution temporelle en quatre étapes pour la formation des gisements. La première étape est à pyrite aurifère riche en inclusions, traduisant un contexte réducteur. Cette étape est reliée à un fluide métamorphique profond qui est aussi responsable de la formation des filons de quartz-carbonate.

La deuxième étape est caractérisée par la présence de sulfates et tourmaline magnésienne dans un contexte oxydant. Cette étape est reliée à des fluides métamorphiques profonds interagissant avec un fluide supracrustal oxydé et sulfaté qui va changer l'état d'oxydoréduction du système. Ce fluide est composé d'eau de mer archéenne évoluée piégée dans les porosités et les fractures des roches volcaniques et plutoniques (Beaudoin et Pitre, 2005).

Les deux dernières étapes sont à pyrite non aurifère riche en arsenic avec un retour à un contexte réducteur. L'arsenic peut être lié à un apport d'origine sédimentaire ou la présence d'eau de mer archéenne évoluée. Le système n'est plus saturé en soufre et la cristallisation est lente, formant des pyrites cubiques. La tourmaline est riche en Fer (schorl). Il serait intéressant de savoir si les chlorites enregistrent la même évolution que les tourmalines de magnésium à ferrique.

Seul la première étape a un effet homogène sur le district. Les étapes suivantes affectent les filons de différentes manières en fonction de leur encaissant. Le pluton de Bourlamaque réduisant l'influence du fluide supracrustal sur les filons et notamment les tourmalines : les valeurs  $\delta^{11}\text{B}$  des tourmalines sont moins légères et les tourmalines moins zonée (peu de schorl).



Pour finir, des datations au Re/Os sur l'or pourraient déterminer l'âge de la première étape : la phase à pyrite aurifère. La dernière phase pourrait être datée grâce aux muscovites qui sont tardives dans l'assemblage. Les étapes intermédiaires ne peuvent pas être contraintes précisément.



## **ANNEXE A PROTOCOLES D'UTILISATION**

### **Protocole d'utilisation du broyeur à mâchoires**

#### **Projet Corridor**

par Lucille Daver

06 Mai 2015

Objectif : faire un broyage préliminaire des roches avant le broyeur électrique

---

#### **I-Nettoyage**

// Le nettoyage des différentes parties du broyeur à mâchoires se fait avant son utilisation pour éviter de les utiliser avec une possible contamination, due à la poussière de roche retombant.

Après l'utilisation, on désassemble la machine. On a donc : 2 plaques percées au centre, 2 plaques mâchoires, 1 plaque à poignée (couvercle) et 4 vis (avec 4 boulons et 5 rondelles).



---

#### **1- Ponçage**

On place toutes les parties sur un morceau de papier brun.

On ponce les 5 plaques en essayant d'éliminer les traces blanches laissées par le

broyage précédent.

Pour les plaques mâchoires, bien insister dans les rainures et faire le verso également

// Il faut porter un tablier en cuir, des lunettes de protection et des gants de cuir

## **2- Air comprimé**

Passer les plaques poncées à l'air comprimé afin d'enlever les éclats et pelures restés.

Le passer également sur les 4 vis et sur la machine (là où s'enclenchent les plaques).

## **3-Éthanol**

Passer généreusement de l'éthanol sur les plaques, les têtes de vis et la machine (là où s'enclenchent les plaques).

## **II-Assemblage**

Lors du broyage, les roches réduites tomberont par le bas au fur et à mesure. On les récupère avec un sac plastique stérile. Celui-ci est disponible en rouleau, on choisit une longueur, on le coupe et on le scelle avec la machine chauffant à la gauche du rouleau.

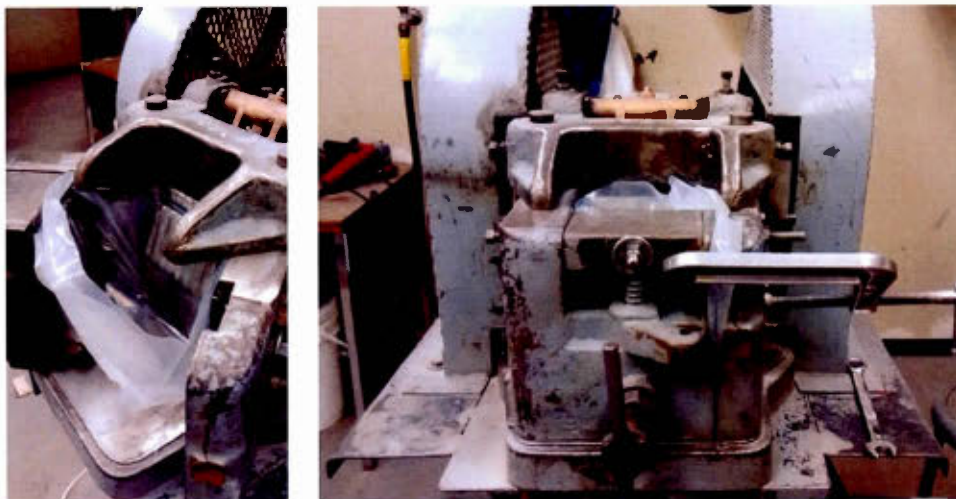
1- On pose en premier les plaques percées au centre et on les fixe avec les vis à tête ronde. On place les rondelles du côté convexe contre la machine et on serre les écrous avec une clef pour qu'elles soient bien fixées.

2- On place le sac plastique contre la paroi centrale et on place la plaque mâchoire, la plus épaisse des deux, par-dessus. On place ensuite la vis, la plus courte des deux, de sorte qu'elle traverse le plastique. On la fixe avec deux rondelles et on serre avec la clef.

3- On place la deuxième plaque mâchoire par-dessus le plastique également, en essayant de le tendre.

4- On ferme ensuite les deux battants de sorte que broyeur n'est qu'une sortie en haut et en bas (où se trouve le sac). On le ferme en utilisant l'étau.





### III-Utilisation

Lorsque le broyeur est complètement assemblé, on peut allumer le courant.

Les fonctions arrêt (bouton rouge du bas) et marche (bouton vert central) se trouvent sur la droite de la machine.

On allume la machine et on place les roches une par une de sorte que le broyeur ne soit jamais plein. Bien replacer le couvercle à chaque fois pour éviter que les roches qui sautent ne ressortent.



### IV-Désassemblage

Lorsque l'échantillon est complètement broyé, on peut éteindre la machine et remettre le courant sur OFF.

On enlève l'étau, puis les plaques mâchoires. On récupère le sac. On enlève les plaques percées et on pose les 5 plaques et les 4 vis sur le papier brun (un nouveau morceau).

On passe un rapide coup d'air comprimé pour enlever le plus gros comme unique nettoyage.



## Protocole d'utilisation du mortier électrique Projet Corridor

par Lucille Daver et Christian Sasseville

9 février 2015

Objectif : Broyer la roche afin de désassembler les minéraux les uns des autres.

---

1- Avant chaque utilisation nettoyer le mortier (voir le protocole de nettoyage du mortier) et bien refermer le crochet

2- Allumer la machine avec le bouton en bas à gauche en dessous de la machine puis le bouton « start » vert.

3- Insérer les échantillons dans le mortier par la porte d'alimentation sur le haut de la machine à droite.

Les échantillons doivent être < 8 mm (travail au broyeur à mâchoires en premier lieu).

4- Insérer au fur et à mesure en surveillant la fenêtre « load control » (indicatif : ne doit pas être dans le rouge).

// Trop d'échantillons en même temps peut casser le mortier surtout s'il s'agit de quartz.

// Plus les échantillons insérés seront gros, plus ils auront besoin de temps pour être réduit.

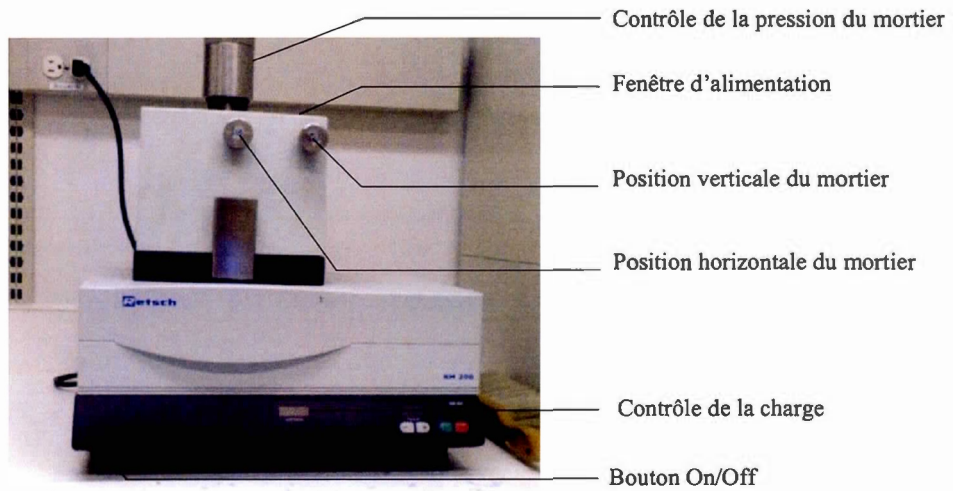
// **Attention au surbroyage**, le but est de séparer les minéraux, pas de les briser.

4- Procéder par étape en éteignant le mortier avec le bouton « stop » et en récupérant le matériel désassemblé au fur et à mesure pour éviter le surbroyage de cette partie-là et éviter de trop remplir le mortier.

// pour séparer la partie broyée de celle qui doit l'être encore un peu, il est possible d'utiliser un tamis de 2mm.

5- Lorsque l'échantillon est fait, éteindre puis vider le mortier et laver grossièrement.

Puis nettoyer le mortier (voir le protocole de nettoyage du mortier).





## **Protocole de Nettoyage**

### **Projet Corridor**

par Lucille Daver

9 février 2015

---

#### **Nettoyage des tamis**

1- Enlever les plus gros grains avec le pinceau bâillonné puis passer le tamis à l'air comprimé.

// Toujours du côté arrière du tamis.

2- Placer les tamis deux par deux au bac à ultra-son pendant 5 min.

// **Attention !** Ne pas rester à côté du bac à ultra-son sans protection auditive.

3- Sécher à l'air comprimé.

// Toujours du côté arrière du tamis.

4- Mettre les tamis sous la hotte pour enlever les dernières traces d'humidité.

// Les tamis doivent être parfaitement secs avant tout tamisage.

#### **Nettoyage du mortier électrique**

// Le mortier est censé être propre

1- Mettre un fond de sable d'Ottawa dans le mortier et le relancer. Cela permet d'enlever les plus petits grains restés sur le mortier.

2- Rincer le bol et le mortier à l'eau

3- Les sécher à l'air comprimé puis passer de l'éthanol.

4- Enlever le joint en caoutchouc et le nettoyer à l'eau puis l'éthanol.

5- Nettoyer le réceptacle du joint, la languette, les portes d'alimentation et les chutes à échantillons à l'eau et à l'éthanol.

// le bol et le mortier, tous deux en agate, sont les parties les plus chères de la machine. Les manipuler avec beaucoup de précautions.

## Protocole de Séparation Projet Corridor

par Lucille Daver et Christian Sasseville

9 février 2015

Objectif : récupérer 500 mg de pyrite par fraction granulométrique  
—> Chaque étape à une taille d'aliquote qui lui correspond

---

### Tri

#### 1- Broyage

Passer les roches au bac à ultra-son pour enlever les résidus pouvant se trouver dessus.

Broyer les roches avec la presse.

// Pas plus de 2000 livres.

#### 2- Granulométrie

**Avant le tamisage**, on récupère une fraction de matériel dit de roche totale que l'on place dans l'aliquote **014** noté « #ech roche totale sec date nom-personne ». Cela permet de garder un échantillon représentatif de celui de départ.

Utilisation des tamis, séparation en six granulométries différentes :

1000  $\mu\text{m}$  (tamis de 1mm)

500  $\mu\text{m}$

250  $\mu\text{m}$

100  $\mu\text{m}$  (tamis de 106  $\mu\text{m}$ )

60  $\mu\text{m}$  (tamis de 63  $\mu\text{m}$ )

40  $\mu\text{m}$  (tamis de 38  $\mu\text{m}$ )

// Pour nettoyer les tamis, voir le protocole de nettoyage des tamis.

### Traitement (Adaptation de la méthode des argiles de Norbert Clauer)

#### 3- Séparation des granulométries

On a 8 sections :

> 1000  $\mu\text{m}$

+500 -1000  $\mu\text{m}$

+250 -500  $\mu\text{m}$

+100 -250  $\mu\text{m}$

+60 -100  $\mu\text{m}$

+40 -60  $\mu\text{m}$

-40  $\mu\text{m}$

roche totale

#### 4- Séparation fine

Malgré le tamisage il reste tout de même des particules très fines dans toutes les granulométries. Cette étape a pour but de nous en débarrasser.

Placer 15 ml de ces fractions dans les aliquotes 030 et on les nomme « #ech granulométrie sec date nom-personne », et mettre le reste dans des béchers de 250 ml notés « #ech granulométrie date nom-personne » et les immerger avec de l'eau distillée.

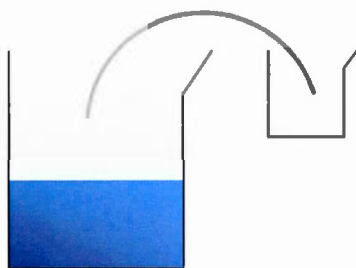
// Pour la fraction +1000 um séparer la partie la plus grossière, mal broyée, pour garder les grains séparés.

// Les béchers sont les seuls contenant qui sont temporaires, écrire au feutre dessus et bien nettoyer à l'éthanol après utilisation pour éviter les contaminations.

Mélanger pour provoquer une première différenciation (les éléments lourds descendent et légers montent) puis les placer dans le bain à ultra-son BRANSON 1200 pendant 5 minutes.

#### 5- Éléments en suspension

Pour le bécher -40 microns, on utilise le bécher de 800 ml. Cette partie contient les argiles, les sulfates (ex anhydrites : mousse blanche), la matière organique...etc. On touille et on laisse reposer 2 h. On récupère ensuite la partie supérieure avec les éléments plus légers dans un bécher de 200 ml en siphonnant les 8 premiers cm. Ces éléments représenteront la partie < 2 microns. À placer, une fois sec, dans l'aliquote 030 et noter « #ech granulométrie date nom ».



Récupération des particules  
< 2µm en suspension

#### 6- Séparation des minéraux lourds : granuloclassement dynamique

Pour faire la séparation des minéraux lourds, on utilise un montage avec deux ampoules à décanter, une supérieure et une inférieure, plus petite avec une rentrée d'eau par le bouchon pour permettre une circulation d'eau.

Remplir d'eau l'ampoule à décanter inférieure et verser l'échantillon du bécher en

entier dans l'ampoule à décanter supérieure en récupérant bien tout avec l'eau distillée. Ne pas garder pas l'eau de l'échantillon qui ne contient que des particules  $< 2\mu\text{m}$ .

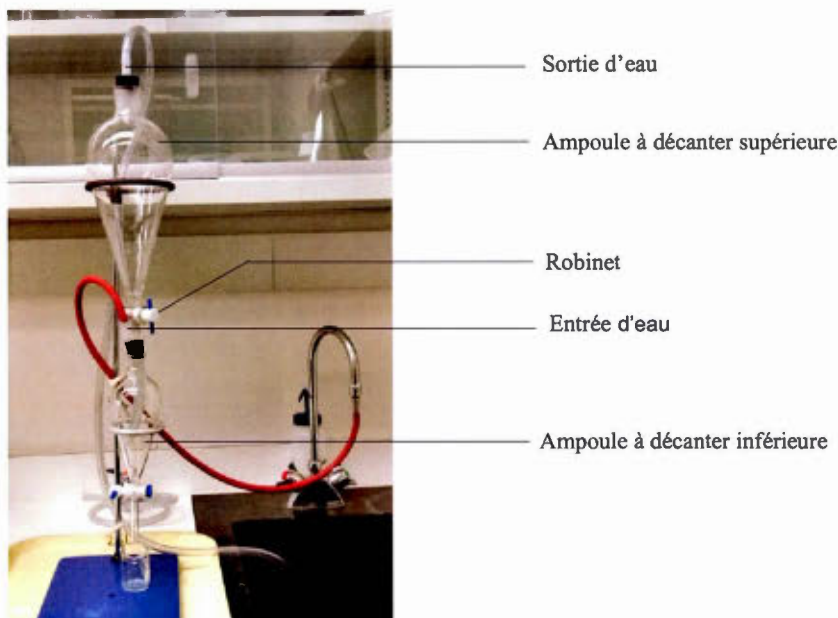
// Attention à ce que le robinet soit fermé lorsque l'échantillon est versé.

Allumer l'eau et ouvrir le robinet de l'ampoule **en même temps**.

En gérant la pression de l'eau entrant dans l'ampoule à décanter inférieure, il sera possible de gérer la différenciation des éléments. Les éléments les plus lourds tomberont dans l'ampoule à décanter inférieure tandis que les autres resteront dans celle supérieure.

Les minéraux tombés au fonds sont récupérés et placés dans un bécher de 50 ml que l'on note au feutre : « #ech granulométrie lourds date nom ».

Les minéraux restés dans l'ampoule supérieure sont récupérés et placés à nouveau dans le bécher de 250 ml que l'on note maintenant : « #ech granulométrie légers date nom ».



### 7- Séchage

Mettre à sécher les béchers sous la hotte une journée et ne les retirer que lorsqu'il ne reste plus aucune trace d'humidité.

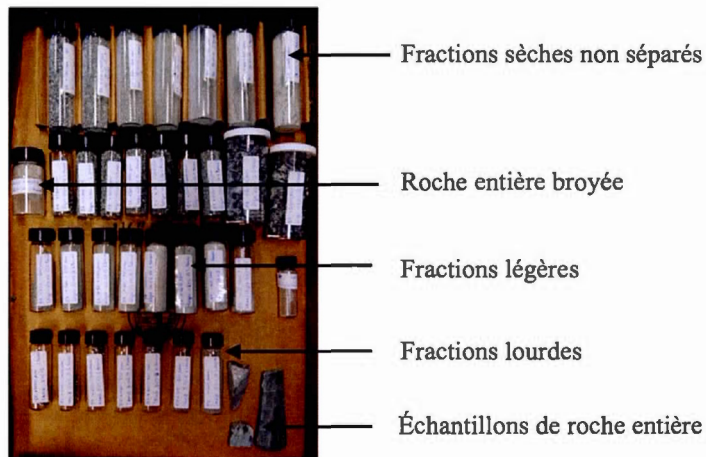
Une fois sec, mettre le matériel lourd de chaque fraction dans les aliquotes **010** que l'on note : « #ech granulométrie lourds date nom » et le matériel plus léger dans les aliquotes **015** que l'on note : « #ech granulométrie légers date nom ».

### 8- Binoculaire

Récupérer les minéraux pour la datation de Re-Os à la binoculaire avec des brucelles.

On les place dans l'aliquote **006** et on le nomme « #ech granulométrie lourd-Re/Os date nom ».

L'aliquote **006** servira également pour récupérer aussi toute autre fraction composée d'un seul minéral important (ex : pyrite, molybdénite, or, etc...) que l'on notera « #ech granulométrie minéral date nom ».



## **Protocole d'utilisation du MEB pour l'analyse EDX Projet Corridor**

par Lucille Daver et Raynald Lapointe

9 février 2015

Objectif : Analyse de la composition des minéraux sélectionnés lors de l'observation à la loupe binoculaire.

### **Allumer le MEB :**

// La plupart du temps le MEB du 7ème est utilisé pour faire de la photographie, il faut donc remettre tous les paramètres d'origine après chaque usage.

Visser le cylindre en aluminium sur lequel se trouve votre échantillon sur le support adapté au MEB.

// Porter des gants pour éviter toute contamination.

### **Appuyer sur AIR**

Ouvrir la machine. Une fenêtre apparaît à l'écran. Régler les setting de la plateforme :

ø15mm (ou ø26mm si on veut avoir plus d'amplitude) et hauteur standard.

La plateforme va se déplacer pour s'ajuster aux nouveaux réglages. Vérifier que la pastille passe en fermant la machine et appuyer sur OK.

// Le haut de l'échantillon sur l'écran est à gauche quand on le place dans la machine. Le plus facile est de faire une marque distinctive sur l'échantillon pour pouvoir reconnaître le sens une fois dans la machine.

On referme le diaphragme à 2 pour avoir moins de lumière.

Dans l'onglet Condition dans la colonne de droite on coche VP-SEM : pression variable

Dans l'onglet Stage dans la colonne de droite on coche Analyse : le plateau va être descendu à 10 mm

### **Appuyer sur EVACUATE**

Dans l'onglet Optic dans la colonne de gauche on met le prof current à 70 et le



vacant à 25 kV

Dans l'onglet Image dans la colonne de gauche pour background on coche Image : permet d'avoir les informations notées sur l'image.

Dans l'onglet **Record** dans la colonne de gauche on coche **embed into image**

quand l'air est complètement évacuer sur **ON** pour allumer le filament

Si besoin est, faire les réglages de stigmatisme en grossissant à plus x10k sur un détail.

Si le stigmatisme n'est pas bon, l'image bougera. On la stabilise avec les boutons X et Y de la console.

### Analyse EDX :

Les analyses se font via le programme AZTEC.

On peut travailler sur un projet ce qui rassemble les analyses en un fichier (exemple : Goldex) qui sera divisé en sous-projet (exemple : 1 minéraux lourds et 2 minéraux légers), en site (exemple : minéral 1, 2, etc.) et points d'analyses (plusieurs analyses possibles sur le même site).

// Faire attention de ne pas bouger la position sur la partie SEM lors d'une analyse EDX. L'image resterait la même alors que la position aurait changé.

Enregistrer le projet dans le serveur D (DATA) et récupérer les fichiers (photo SEM et analyses EDX) sur l'ordinateur le plus à droite.

### Arrêter le MEB :

On appuie sur OFF pour arrêter le filament.

On sauvegarde les photos en réseau dans le dossier Data—> Meb—> dossier à votre nom

Dans l'onglet Condition dans la colonne de droite remettre SEM et remettre le diaphragme à 3.

Appuyer sur **AIR**

Récupérer son échantillon et appuyer sur **EVACUATE**

// La machine doit toujours être sous vide lorsqu'elle n'est pas utilisée pour protéger le filament et éviter toute contamination.

## **Protocole de préparation des échantillons pour analyse XRD et acquisition des données à partir du Bruker D5000**

### **Projet Corridor**

par Lucille Daver

27 novembre 2015

Objectif : analyser avec la méthode de diffraction aux rayons X (XRD) chaque granulométrie de chaque échantillon récolté pour le projet Corridor afin d'avoir un aperçu direct des minéraux présent en fonction de la fraction.

Analyses effectuées par Michel Préda

---

### **Préparation des échantillons**

Les échantillons sélectionnés sont ceux de la fraction sèche non séparée pour chaque granulométrie.

Cette méthode requiert l'utilisation de matériel < 10 microns, il faut donc broyer les minéraux finement. Cela permet également de ne pas avoir de minéraux orienté ce qui gênerait la lecture de l'échantillon.

La poudre obtenue est pressée dans une palette (Fig.1) qui servira de support dans la machine.

### **Analyse des échantillons**

La machine utilisée est le Bruker D5000.

L'angle d'interval et de 3 à 90 2 theta avec un pas d'angle de 0,02 et 0,6 sec par pas.

Les tubes utilisés sont en cobalt (Xray  $\lambda$ : CoKa1:1,78896).

Les palettes sont placées côte à côte dans la machine et un bras robotisé viendra chercher les palettes une après l'autre pour les placer dans la zone d'analyse.

Chaque analyse dure 15 min.

### **Analyse des résultats**

Les analyses effectuées par le Bruker D5000 sont directement envoyées à l'ordinateur qui lui est connecté.

Le logiciel utilisé pour traiter les résultats d'analyse s'appelle EVA (DIFFRAC.EVA de DIFFRAC.SUITE propriété de Bruker). C'est un logiciel

d'identification de phases et d'analyse de phases quantitative qui permet de nommer les minéraux présent dans les échantillons.

exemple : Quartz :  $D_1$  3,342 Å (20)

L'approche par granulométrie de cette méthode nous permettra de suivre l'évolution quantitative des minéraux en fonction de la granulométrie.

## ANNEXE B

### RÉSULTATS DES MESURES XRD SUR LES GRANULOMÉTRIES CHOISIS

| <b>Goldex 91</b>  | <b>&lt; 40 μm</b> | <b>40 - 60 μm</b> | <b>60 - 100 μm</b> | <b>100 - 250 μm</b> | <b>250 - 500 μm</b> | <b>500 - 1000 μm</b> |
|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
|                   | <b>%</b>          | <b>%</b>          | <b>%</b>           | <b>%</b>            | <b>%</b>            | <b>%</b>             |
| <b>Quartz</b>     | 18,5%             | 17,4%             | 17,0%              | 17,9%               | 18,2%               | 13,4%                |
| <b>Biotite</b>    | 0,4%              | 0,4%              | 1,4%               | 1,6%                | 1,6%                | 1,1%                 |
| <b>Chlorite</b>   | 2,8%              | 2,4%              | 3,1%               | 2,8%                | 2,9%                | 1,8%                 |
| <b>Albite</b>     | 48,1%             | 51,5%             | 52,0%              | 52,7%               | 57,2%               | 65,0%                |
| <b>Microcline</b> | 1,9%              | 0,8%              | 0,7%               | 0,3%                | 0,2%                | 0,2%                 |
| <b>Calcite</b>    | 9,6%              | 8,2%              | 5,7%               | 5,4%                | 5,3%                | 4,5%                 |
| <b>Dolomite</b>   | 16,1%             | 17,6%             | 18,2%              | 16,7%               | 12,9%               | 12,3%                |
| <b>Dravite</b>    | 0,2%              | 0,2%              | 0,2%               | 0,3%                | 0,3%                | 0,3%                 |
| <b>Schorl</b>     | 0,2%              | 0,3%              | 0,3%               | 0,2%                | 0,2%                | 0,2%                 |
| <b>Uvite</b>      | 0,1%              | 0,2%              | 0,2%               | 0,3%                | 0,3%                | 0,3%                 |
| <b>Pyrite</b>     | 2,1%              | 1,0%              | 1,2%               | 1,8%                | 0,9%                | 0,9%                 |
|                   | 100%              | 100,0%            | 100,0%             | 100,0%              | 100,0%              | 100,0%               |

[illegible]

| <b>Lac Herbin<br/>73</b> | <b>&lt; 40 µm</b> | <b>40 - 60 µm</b> | <b>60 - 100 µm</b> | <b>100 - 250 µm</b> | <b>250 - 500<br/>µm</b> | <b>500 - 1000<br/>µm</b> |
|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|
|                          | <b>%</b>          | <b>%</b>          | <b>%</b>           | <b>%</b>            | <b>%</b>                | <b>%</b>                 |
| <b>Quartz</b>            | 86,00%            | 90,10%            | 89,80%             | 93,10%              | 93,10%                  | 94,70%                   |
| <b>Clinochlore</b>       | 4,80%             | 3,70%             | 1,90%              | 1,20%               | 1,70%                   | 1,00%                    |
| <b>Calcite Mg</b>        | 2,60%             | 2,10%             | 1,60%              | 1,70%               | 1,00%                   | 1,90%                    |
| <b>Dolomite</b>          | 2,70%             | 2,00%             | 3,40%              | 2,40%               | 2,20%                   | 0,80%                    |
| <b>Pyrite</b>            | 1,50%             | 0,60%             | 1,20%              | 0,70%               | 1,20%                   | 0,70%                    |
| <b>Uvite</b>             | 0,20%             | 0,30%             | 1,30%              | 0,40%               | 0,20%                   | 0,10%                    |
| <b>Dravite</b>           | 1,00%             | 0,50%             | 0,40%              | 0,30%               | 0,40%                   | 0,50%                    |
| <b>Schorl</b>            | 1,20%             | 0,70%             | 0,40%              | 0,20%               | 0,20%                   | 0,30%                    |
|                          | 100,00%           | 100,00%           | 100,00%            | 100,00%             | 100,00%                 | 100,00%                  |

| <b>Beaufor<br/>10</b> | <b>&lt; 40<br/>µm</b> | <b>40 - 60<br/>µm</b> | <b>60 - 100<br/>µm</b> | <b>100 - 250<br/>µm</b> | <b>250 - 500<br/>µm</b> | <b>500 - 1000<br/>µm</b> | <b>Roche<br/>Totale</b> |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                       | <b>%</b>              | <b>%</b>              | <b>%</b>               | <b>%</b>                | <b>%</b>                | <b>%</b>                 | <b>%</b>                |
| <b>Quartz</b>         | 64,6%                 | 71,7%                 | 77,4%                  | 83,7%                   | 82,3%                   | 84,9%                    | 85,2%                   |
| <b>Biotite</b>        | 1,9%                  | 1,7%                  | 1,4%                   | 1,4%                    | 0,6%                    | 0,5%                     | 0,5%                    |
| <b>Chlorite</b>       | 6,1%                  | 7,2%                  | 2,3%                   | 1,7%                    | 2,8%                    | 3,3%                     | 3,4%                    |
| <b>Calcite</b>        | 12,1%                 | 9,2%                  | 7,6%                   | 5,1%                    | 3,4%                    | 1,2%                     | 1,4%                    |
| <b>Dolomit</b>        | 0,6%                  | 2,1%                  | 1,0%                   | 0,1%                    | 0,1%                    | 0,1%                     | 0,1%                    |
| <b>Scheelite</b>      | 5,1%                  | 3,1%                  | 4,2%                   | 2,9%                    | 3,1%                    | 2,7%                     | 2,3%                    |
| <b>Dravite</b>        | 1,0%                  | 0,6%                  | 0,6%                   | 0,5%                    | 0,4%                    | 0,2%                     | 0,3%                    |
| <b>Schorl</b>         | 0,6%                  | 0,9%                  | 0,7%                   | 0,3%                    | 0,6%                    | 0,1%                     | 0,2%                    |
| <b>Uvite</b>          | 0,6%                  | 0,2%                  | 0,2%                   | 0,2%                    | 0,3%                    | 0,1%                     | 0,2%                    |
| <b>Pyrite</b>         | 7,4%                  | 3,3%                  | 4,6%                   | 4,1%                    | 6,4%                    | 6,9%                     | 6,4%                    |
|                       | 100%                  | 100,0%                | 100,0%                 | 100,0%                  | 100,0%                  | 100,0%                   | 100,0%                  |

**ANNEXE C**  
**PHOTO SEM DES TOURMALINES ANALYSEES AU LA-ICP-  
MS APRES LEUR ABLATION LASER**



TL91-1: 230 x 177  $\mu\text{m}$



TL91-2: 250 x 220  $\mu\text{m}$



TL91-3: 408 x 170  $\mu\text{m}$



TL91-4: 377 x 200  $\mu\text{m}$



TL91-5: 355 x 177  $\mu\text{m}$



TL91-6: 282 x 182  $\mu\text{m}$



TL91-7: 255 x 131  $\mu\text{m}$



TL88-1: 286 x 136  $\mu\text{m}$



TL88-2: 176 x 52  $\mu\text{m}$



TL88-3: 600 x 140  $\mu\text{m}$



TL88-4: 230 x 70  $\mu\text{m}$



TL88-5: 160 x 71  $\mu\text{m}$



TL88-6: 147 x 68  $\mu\text{m}$

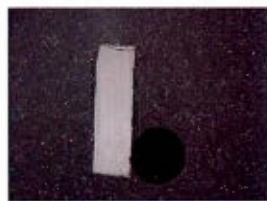
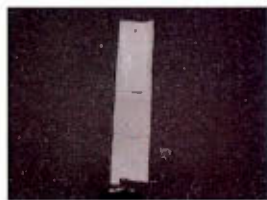


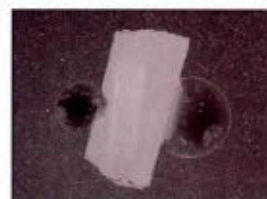
TL88-7: 169 x 110  $\mu\text{m}$



TL88-8: 250 x 100  $\mu\text{m}$



TL87-1: 33 x 70  $\mu\text{m}$ TL87-2: 176 x 57  $\mu\text{m}$ TL87-3: 600 x 140  $\mu\text{m}$ TL87-4: 230 x 70  $\mu\text{m}$ TL87-5: 146 x 66  $\mu\text{m}$ TL87-6: 500 x 147  $\mu\text{m}$ TL87-7: 442 x 186  $\mu\text{m}$ TL87-8: 170 x 82  $\mu\text{m}$ TL85-1: 386 x 98  $\mu\text{m}$ TL85-2: 377 x 97  $\mu\text{m}$ TL85-3: 217 x 96  $\mu\text{m}$ TL85-4: 180 x 122  $\mu\text{m}$ TL85-5: 280 x 81  $\mu\text{m}$ TL85-6: 300 x 76  $\mu\text{m}$ TL85-7: 175 x 80  $\mu\text{m}$ TL85-8: 477 x 110  $\mu\text{m}$

TL73-1: 158 x 110  $\mu\text{m}$ TL73-2: 243 x 96  $\mu\text{m}$ TL73-3: 337 x 97  $\mu\text{m}$ TL73-4: 164 x 80  $\mu\text{m}$ TL73-5: 277 x 98  $\mu\text{m}$ TL73-6: 158 x 82  $\mu\text{m}$ TL73-7: 141 x 80  $\mu\text{m}$ TL10-1: 381 x 160  $\mu\text{m}$ TL10-2: 343 x 130  $\mu\text{m}$ TL10-3: 277 x 233  $\mu\text{m}$ TL10-4: 224 x 161  $\mu\text{m}$ TL10-5: 312 x 93  $\mu\text{m}$ TL10-6: 183 x 76  $\mu\text{m}$ TL10-7: 123 x 130  $\mu\text{m}$ TL10-8: 193 x 70  $\mu\text{m}$

**ANNEXE D**  
**RESULTATS DES ANALYSES LA-ICP-MS DES 47**  
**TOURMALINES ANALYSÉES.**

| Échantillon      |                                | Goldex        |               |               |               |               |               |               |               |
|------------------|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                  |                                | TL-91-1       | TL-91-2       | TL-91-3       | TL-91-4       | TL-91-5       | TL-91-6       | TL-91-7       | TL-91-8       |
| Oxyde<br>en %wt  | SiO <sub>2</sub>               | 35,1060       | 35,9164       | 36,2772       | 35,1322       | 35,6896       | 36,1980       | 36,2216       | 35,9665       |
|                  | TiO <sub>2</sub>               | 0,3264        | 0,4896        | 0,2674        | 0,3340        | 0,3685        | 0,3478        | 0,3181        | 0,2878        |
|                  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 34,4164       | 34,0689       | 34,3150       | 35,8694       | 34,0114       | 33,3769       | 33,2387       | 34,8470       |
|                  | FeO                            | 5,4763        | 4,6524        | 5,0373        | 5,6029        | 5,1381        | 5,3223        | 5,3846        | 4,6502        |
|                  | MgO                            | 7,8371        | 8,0932        | 7,1791        | 6,5549        | 7,7876        | 7,5478        | 7,5583        | 7,3880        |
|                  | MnO                            | 0,0063        | 0,0070        | 0,0051        | 0,0052        | 0,0078        | 0,0079        | 0,0077        | 0,0057        |
|                  | CaO                            | 0,7577        | 0,6859        | 0,5766        | 0,5965        | 0,7983        | 0,7474        | 0,7107        | 0,6187        |
|                  | Na <sub>2</sub> O              | 2,2585        | 2,0866        | 2,1898        | 2,1096        | 2,1903        | 2,2649        | 2,3028        | 2,1869        |
|                  | K <sub>2</sub> O               | 0,0083        | 0,0050        | 0,0083        | 0,0081        | 0,0065        | 0,0079        | 0,0085        | 0,0097        |
|                  | Li <sub>2</sub> O              | 0,0004        | 0,0005        | 0,0005        | 0,0004        | 0,0002        | 0,0002        | 0,0003        | 0,0004        |
|                  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,1281        | 0,0002        | 0,0089        | 0,0981        | 0,0956        | 0,0749        | 0,1353        | 0,0253        |
|                  | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 10,1697       | 10,4045       | 10,5090       | 10,1773       | 10,3388       | 10,4860       | 10,4929       | 10,4190       |
|                  | H <sub>2</sub> O               | 3,5088        | 3,5898        | 3,6259        | 3,5114        | 3,5671        | 3,6179        | 3,6203        | 3,5948        |
|                  | ZnO                            | 0,0153        | 0,0135        | 0,0188        | 0,0202        | 0,0128        | 0,0112        | 0,0115        | 0,0186        |
| Majeur<br>en ppm | Si                             | 169800,0<br>0 | 169800,0<br>0 | 169800,0<br>0 | 169800,0<br>0 | 169800,0<br>0 | 169800,0<br>0 | 169800,0<br>0 | 169800,0<br>0 |
|                  | Na                             | 17336,58      | 15655,56      | 16266,84      | 16181,94      | 16538,52      | 16861,14      | 17132,82      | 16385,70      |
|                  | Ca                             | 5603,40       | 4958,16       | 4126,14       | 4408,01       | 5807,16       | 5360,59       | 5094,00       | 4465,74       |
|                  | Mg                             | 48902,40      | 49360,86      | 43349,94      | 40870,86      | 47798,70      | 45676,20      | 45710,16      | 44997,00      |
|                  | Fe                             | 44046,12      | 36574,92      | 39206,82      | 45030,96      | 40650,12      | 41516,10      | 41974,56      | 36507,00      |
|                  | Al                             | 188478,0<br>0 | 182365,2<br>0 | 181855,8<br>0 | 196288,8<br>0 | 183214,2<br>0 | 177271,2<br>0 | 176422,2<br>0 | 186270,6<br>0 |
|                  | K                              | 71,32         | 42,21         | 69,11         | 69,62         | 55,19         | 65,71         | 71,15         | 81,50         |
|                  | Ti                             | 2024,02       | 2968,10       | 1604,61       | 2069,86       | 2248,15       | 2091,94       | 1911,95       | 1742,15       |
|                  | Cr                             | 906,73        | 1,71          | 61,30         | 693,80        | 665,62        | 514,49        | 928,81        | 174,89        |
|                  | Mn                             | 50,23         | 55,15         | 39,44         | 41,33         | 61,30         | 61,64         | 59,60         | 44,83         |

| Échantillon      |    | Goldex   |          |          |          |          |          |          |          |
|------------------|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                  |    | TL-91-1  | TL-91-2  | TL-91-3  | TL-91-4  | TL-91-5  | TL-91-6  | TL-91-7  | TL-91-8  |
| Traces<br>en ppm | Co | 0,3668   | 1,0562   | 0,7013   | 1,2395   | 0,3956   | 1,0256   | 0,6351   | 0,2768   |
|                  | Li | 1,7795   | 2,1395   | 2,4723   | 1,8525   | 1,1529   | 1,1478   | 1,2905   | 1,7659   |
|                  | Be | 0        | 0,2123   | 0,4415   | 4,1261   | 0,2428   | 0,0747   | 0,0662   | 0,3396   |
|                  | Sc | 45,0819  | 28,3396  | 24,7568  | 56,3736  | 52,9776  | 37,0843  | 37,4239  | 39,054   |
|                  | Ni | 177,9504 | 194,2512 | 107,9928 | 141,6132 | 140,5944 | 144,6696 | 145,0092 | 91,692   |
|                  | Cu | 3,1413   | 1,9527   | 2,0376   | 3,9733   | 1,9697   | 2,3602   | 5,8411   | 3,7356   |
|                  | V  | 456,762  | 448,272  | 450,819  | 641,6742 | 449,4606 | 442,6686 | 475,44   | 436,386  |
|                  | Zn | 122,7654 | 108,1626 | 151,2918 | 162,6684 | 102,729  | 89,8242  | 92,0316  | 149,7636 |
|                  | Ga | 57,3924  | 43,8254  | 51,3985  | 58,7508  | 51,1438  | 47,9006  | 52,1286  | 56,2038  |
|                  | Rb | 0,034    | 0,0278   | 0,0425   | 0,0351   | 0,0239   | 0,0205   | 0,0374   | 0,0509   |
|                  | Sr | 784,476  | 443,178  | 735,234  | 998,424  | 714,858  | 745,422  | 653,73   | 794,664  |
|                  | Y  | 0        | 0,0093   | 0,0312   | 0,2496   | 0,0679   | 0,035    | 0,0951   | 0,0272   |
|                  | Zr | 0,107    | 0,0117   | 0,0611   | 0,1053   | 0,0323   | 0,0934   | 1,1716   | 0,1936   |
|                  | Nb | 0        | 0        | 0,017    | 0,0109   | 0,0119   | 0,0076   | 0,0066   | 0        |
|                  | Mo | 0        | 0        | 0,0374   | 0        | 0        | 0        | 0,0289   | 0        |
|                  | Ag | 0,0849   | 0,0577   | 0,0611   | 0,0323   | 0,0272   | 0,0594   | 0,0781   | 0,0425   |
|                  | Cd | 0,0815   | 0,1579   | 0,0951   | 0,1953   | 0,1172   | 0,0509   | 0,0187   | 0,0611   |
|                  | In | 0,0713   | 0,0326   | 0,0503   | 0,0915   | 0,0784   | 0,0521   | 0,0764   | 0,0627   |
|                  | Sn | 0,8847   | 0,4058   | 0,6962   | 0,7352   | 0,8082   | 0,7913   | 0,9305   | 0,849    |
|                  | Sb | 0,0475   | 0,0221   | 0,0509   | 0,1664   | 0,0662   | 0,0526   | 0,0951   | 0,0374   |
|                  | Cs | 0,0025   | 0        | 0,0063   | 0,009    | 0,0022   | 0,0083   | 0,0131   | 0        |
|                  | Ba | 2,6149   | 0,5637   | 1,1886   | 1,5112   | 1,9527   | 2,2583   | 2,9375   | 1,8848   |
|                  | Hf | 0        | 0        | 0        | 0,0073   | 0        | 0        | 0,0061   | 0,0065   |
|                  | W  | 0        | 0,02     | 0,0156   | 0,107    | 0,0306   | 0,034    | 0,0475   | 0,0238   |
|                  | Au | 0        | 0        | 0,0815   | 0,0679   | 0,0068   | 0,0204   | 0        | 0,0441   |
|                  | Tl | 0,0027   | 0,0061   | 0,0082   | 0,0022   | 0,0078   | 0,0046   | 0,0134   | 0,0122   |
|                  | Pb | 3,8375   | 2,221    | 3,5828   | 4,5846   | 2,9036   | 3,2092   | 2,9885   | 4,4997   |
|                  | Bi | 0,0832   | 0,0633   | 0,09     | 0,0608   | 0,0593   | 0,0421   | 0,0611   | 0,0917   |
|                  | Th | 0        | 0,0039   | 0,7811   | 0,0289   | 0,0102   | 0,09     | 0,0129   | 0,0849   |
|                  | U  | 0,0001   | 0,0002   | 0,09     | 0,0075   | 0,0002   | 0,0134   | 0,0204   | 0,0068   |

| Échantillon               |    | Goldex  |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |    | TL-91-1 | TL-91-2 | TL-91-3 | TL-91-4 | TL-91-5 | TL-91-6 | TL-91-7 | TL-91-8 |
| Terres<br>Rares<br>en ppm | La | 0,056   | 0,0177  | 0,1189  | 0,2106  | 0,1223  | 0,0832  | 0,0917  | 0,1681  |
|                           | Ce | 0,1121  | 0,0662  | 0,1953  | 0,3736  | 0,1511  | 0,1647  | 0,1613  | 0,3056  |
|                           | Pr | 0,0071  | 0,0041  | 0,0144  | 0,0314  | 0,0158  | 0,0155  | 0,0171  | 0,0374  |
|                           | Nd | 0,1274  | 0,0374  | 0,0934  | 0,1358  | 0,0985  | 0,0679  | 0,0679  | 0,0543  |
|                           | Sm | 0       | 0       | 0,0323  | 0,0187  | 0,0136  | 0       | 0       | 0       |
|                           | Eu | 0,0594  | 0,0321  | 0,0594  | 0,0951  | 0,0577  | 0,0645  | 0,0492  | 0,0458  |
|                           | Gd | 0       | 0       | 0,0063  | 0,1172  | 0,0425  | 0,0122  | 0,017   | 0,0798  |
|                           | Tb | 0       | 0       | 0,0025  | 0,008   | 0       | 0       | 0,002   | 0,0022  |
|                           | Dy | 0       | 0       | 0,0083  | 0,0441  | 0,0136  | 0,0119  | 0       | 0       |
|                           | Ho | 0       | 0       | 0,0022  | 0,0095  | 0       | 0,0022  | 0       | 0,0039  |
|                           | Er | 0       | 0       | 0,0144  | 0,037   | 0,0048  | 0,0042  | 0       | 0       |
|                           | Tm | 0       | 0       | 0,0012  | 0,0025  | 0       | 0       | 0,0015  | 0,0017  |
|                           | Yb | 0       | 0       | 0,0048  | 0,0309  | 0,0095  | 0,0051  | 0       | 0,0238  |
|                           | Lu | 0       | 0       | 0,0046  | 0,0083  | 0       | 0       | 0       | 0,0017  |

| Échantillon         |                                | Lamaque           |         |          |          |          |         |          |          |
|---------------------|--------------------------------|-------------------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
|                     |                                | Zone Parallèle 88 |         |          |          |          |         |          |          |
|                     |                                | TL-88-1           | TL-88-2 | TL-88-3  | TL-88-4  | TL-88-5  | TL-88-6 | TL-88-7  | TL-88-8  |
| Oxydes<br>(en %wt)  | SiO <sub>2</sub>               | 33,863            | 34,9417 | 34,8208  | 35,4276  | 34,2355  | 33,8234 | 35,6804  | 34,5368  |
|                     | TiO <sub>2</sub>               | 0,2285            | 0,4824  | 0,227    | 0,2009   | 0,1824   | 0,2569  | 0,3114   | 0,6411   |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 38,641            | 37,3723 | 37,4583  | 36,7968  | 39,1266  | 37,0723 | 36,3346  | 36,8477  |
|                     | FeO                            | 4,476             | 4,4169  | 4,768    | 4,0905   | 4,0558   | 4,5969  | 4,5532   | 4,8808   |
|                     | MgO                            | 7,011             | 6,7387  | 6,7181   | 7,3322   | 6,7671   | 6,738   | 6,5797   | 7,1934   |
|                     | MnO                            | 0,0257            | 0,0244  | 0,0261   | 0,0245   | 0,0262   | 0,0252  | 0,0243   | 0,0479   |
|                     | CaO                            | 0,5825            | 0,5099  | 0,5022   | 0,4681   | 0,5083   | 2,4334  | 0,6114   | 0,6083   |
|                     | Na <sub>2</sub> O              | 1,9417            | 1,8912  | 1,9044   | 1,8327   | 1,6481   | 1,8691  | 1,9964   | 1,7605   |
|                     | K <sub>2</sub> O               | 0,0046            | 0,0046  | 0,0049   | 0,004    | 0,004    | 0,0035  | 0,0042   | 0,0049   |
|                     | Li <sub>2</sub> O              | 0,001             | 0,0009  | 0,0012   | 0,0009   | 0,0011   | 0,0012  | 0,001    | 0,0006   |
|                     | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,0308            | 0,0025  | 0,0015   | 0,0181   | 0,1057   | 0,0012  | 0,0011   | 0,0212   |
|                     | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 9,8096            | 10,1221 | 10,0871  | 10,2629  | 9,9175   | 9,7982  | 10,3361  | 10,0048  |
|                     | H <sub>2</sub> O               | 3,3846            | 3,4924  | 3,4803   | 3,5409   | 3,4218   | 3,3806  | 3,5662   | 3,4519   |
|                     | ZnO                            | 0,0154            | 0,0148  | 0,0172   | 0,0093   | 0,0047   | 0,0136  | 0,0146   | 0,0101   |
| Majeurs<br>(en ppm) | Si                             | 169800            | 169800  | 169800   | 169800   | 169800   | 169800  | 169800   | 169800   |
|                     | Na                             | 15451,8           | 14585,8 | 14738,64 | 13940,58 | 12972,72 | 14891,4 | 15078,24 | 13736,82 |
|                     | Ca                             | 4465,74           | 3788,23 | 3744,09  | 3429,96  | 3854,46  | 18678   | 4448,76  | 4572,714 |
|                     | Mg                             | 45353,58          | 42246,2 | 42263,22 | 45336,6  | 43299    | 43638,6 | 40395,42 | 45625,26 |
|                     | Fe                             | 37322,04          | 35691,9 | 38663,46 | 32601,6  | 33450,6  | 38374,8 | 36031,56 | 39903    |
|                     | Al                             | 219381,6          | 205627  | 206816,4 | 199684,8 | 219721,2 | 210721  | 195779,4 | 205118,4 |
|                     | K                              | 41,0916           | 39,3596 | 42,46698 | 34,2996  | 35,3184  | 30,9885 | 35,11464 | 43,1292  |
|                     | Ti                             | 1468,77           | 3005,46 | 1419,528 | 1234,446 | 1159,734 | 1653,85 | 1900,062 | 4041,24  |
|                     | Cr                             | 225,834           | 17,6592 | 10,3578  | 126,6708 | 767,496  | 8,9994  | 7,8108   | 152,82   |
|                     | Mn                             | 213,7782          | 196,798 | 210,8916 | 194,2512 | 215,4762 | 209,872 | 191,5344 | 390,54   |

| Échantillon        |    | Lamaque           |         |          |          |          |         |          |              |
|--------------------|----|-------------------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|--------------|
|                    |    | Zone Parallèle 88 |         |          |          |          |         |          |              |
|                    |    | TL-88-1           | TL-88-2 | TL-88-3  | TL-88-4  | TL-88-5  | TL-88-6 | TL-88-7  | TL-88-8      |
| Traces<br>(en ppm) | Co | 0,6741            | 0,613   | 0,815    | 0,6113   | 1,0697   | 1,0528  | 1,0307   | 1,2905       |
|                    | Li | 5,1619            | 4,245   | 5,926    | 4,262    | 5,3317   | 5,943   | 4,8223   | 3,0734       |
|                    | Be | 1,2395            | 1,6131  | 1,1377   | 1,2056   | 0,832    | 0,0815  | 1,7659   | 6,2317       |
|                    | Sc | 22,1419           | 17,4724 | 11,2068  | 30,6659  | 15,6216  | 20,1892 | 20,2741  | 23,2626      |
|                    | Ni | 17,0989           | 17,2856 | 25,47    | 13,9236  | 36,507   | 20,0364 | 16,8951  | 21,7344      |
|                    | Cu | 2,7508            | 2,4451  | 2,4621   | 6,6392   | 14,7896  | 4,6865  | 3,4469   | 15,7914      |
|                    | V  | 251,9832          | 245,7   | 232,626  | 199,8546 | 201,7224 | 255,718 | 274,9062 | 244,342<br>2 |
|                    | Zn | 123,4446          | 118,52  | 137,8776 | 74,712   | 37,6956  | 109,181 | 117,3318 | 81,3342      |
|                    | Ga | 40,2256           | 38,0012 | 37,1862  | 32,7714  | 33,96    | 38,7144 | 41,2614  | 34,5203      |
|                    | Rb | 0,026             | 0,0306  | 0,0263   | 0,1019   | 0,0374   | 0,0357  | 0,0306   | 0,0577       |
|                    | Sr | 182,8746          | 175,912 | 178,29   | 141,2736 | 178,29   | 118,011 | 137,8776 | 210,382<br>2 |
|                    | Y  | 1,664             | 0,1494  | 0,2326   | 0,1664   | 0,3719   | 11,886  | 0,3821   | 0,1019       |
|                    | Zr | 0,0917            | 3,0564  | 0,2819   | 1,3244   | 2,8866   | 137,538 | 2,3942   | 2,0376       |
|                    | Nb | 0                 | 2,1395  | 0        | 0,0093   | 0        | 0,0272  | 0,0645   | 0,019        |
|                    | Mo | 0                 | 0       | 0        | 0,1528   | 0        | 0,5773  | 0,0187   | 0,1324       |
|                    | Ag | 0,0526            | 0,034   | 0,073    | 0,0713   | 0,2038   | 0,0611  | 0,0255   | 0,1392       |
|                    | Cd | 0,3107            | 0,1494  | 0,2055   | 0,2547   | 0        | 0,2411  | 0,0238   | 0,0408       |
|                    | In | 0,1087            | 0,1172  | 0,0599   | 0,09     | 0,0857   | 0,1358  | 0,129    | 0,1165       |
|                    | Sn | 1,754             | 2,2923  | 1,552    | 1,8848   | 1,9527   | 2,7508  | 2,4112   | 2,4604       |
|                    | Sb | 0,0374            | 0,1087  | 0,0526   | 0,146    | 0,1223   | 0,0391  | 0,0374   | 0,1002       |
|                    | Cs | 0,0095            | 0,0032  | 0,0068   | 0,0073   | 0        | 0       | 0,0012   | 0,0012       |
|                    | Ba | 0                 | 0,0866  | 0,2004   | 0,832    | 0,6622   | 0,5264  | 0,107    | 0,7471       |
|                    | Hf | 0                 | 0,0696  | 0        | 0,0044   | 0,0594   | 4,0752  | 0,0696   | 0,0526       |
|                    | W  | 0,0098            | 2,4621  | 0,0085   | 0,0492   | 0,0255   | 0,1766  | 0,0968   | 0,0611       |
|                    | Au | 0,0425            | 0,0187  | 0,0187   | 0,1749   | 0,1409   | 0,0306  | 0,0119   | 0,0543       |
|                    | Tl | 0,0121            | 0,0087  | 0,0036   | 0,0107   | 0,017    | 0,0015  | 0,009    | 0,0073       |
|                    | Pb | 5,8921            | 5,2129  | 5,2129   | 22,2438  | 3,7186   | 4,1601  | 4,3299   | 6,1977       |
|                    | Bi | 0,146             | 0,1223  | 0,0885   | 0,3226   | 0,2173   | 0,1579  | 0,0479   | 0,3464       |
|                    | Th | 0,7641            | 0,0255  | 0,0171   | 0,2377   | 0,0261   | 0,9339  | 0,017    | 0,0053       |
|                    | U  | 0,0238            | 0,008   | 0,0078   | 0,1647   | 0,0221   | 0,4245  | 0,0161   | 0,009        |



| Échantillon               |    | Lamaque           |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|----|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |    | Zone Parallèle 88 |         |         |         |         |         |         |         |
|                           |    | TL-88-1           | TL-88-2 | TL-88-3 | TL-88-4 | TL-88-5 | TL-88-6 | TL-88-7 | TL-88-8 |
| Terres<br>Rares<br>en ppm | La | 5,2638            | 0,0713  | 0,1257  | 0,0543  | 0,0934  | 4,9242  | 0,1087  | 0,1155  |
|                           | Ce | 14,9424           | 0,1664  | 0,1749  | 0,1307  | 0,1002  | 13,0746 | 0,3379  | 0,1664  |
|                           | Pr | 1,8169            | 0,0061  | 0,018   | 0,0095  | 0,0255  | 1,698   | 0,0246  | 0,0127  |
|                           | Nd | 7,1316            | 0,0272  | 0,0679  | 0,0543  | 0,2004  | 7,1316  | 0,0781  | 0,0747  |
|                           | Sm | 1,3075            | 0       | 0,0238  | 0       | 0,0934  | 1,5961  | 0,011   | 0       |
|                           | Eu | 0,2292            | 0,0416  | 0,0543  | 0,0425  | 0,0441  | 0,2258  | 0,0498  | 0,1019  |
|                           | Gd | 0,6622            | 0       | 0       | 0,0475  | 0       | 1,8169  | 0,056   | 0,0425  |
|                           | Tb | 0,1274            | 0,002   | 0,001   | 0,0054  | 0       | 0,2683  | 0,0065  | 0       |
|                           | Dy | 0,5434            | 0       | 0       | 0,0102  | 0,0289  | 1,7829  | 0,0475  | 0,0042  |
|                           | Ho | 0,0594            | 0,0049  | 0,0058  | 0,0061  | 0,0083  | 0,3651  | 0,0121  | 0,0022  |
|                           | Er | 0,1698            | 0,0255  | 0,0158  | 0,0408  | 0,0119  | 1,0528  | 0,025   | 0       |
|                           | Tm | 0,0166            | 0,0031  | 0,0041  | 0,0104  | 0,0017  | 0,1647  | 0,0031  | 0       |
|                           | Yb | 0,0815            | 0,0097  | 0,0097  | 0,129   | 0,0543  | 1,1546  | 0,0408  | 0       |
|                           | Lu | 0,0114            | 0,0031  | 0       | 0,0204  | 0,0036  | 0,1851  | 0,0059  | 0,0041  |

| Échantillon      |                                | Lamaque          |          |          |         |          |         |          |          |
|------------------|--------------------------------|------------------|----------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|
|                  |                                | Zone Triangle 87 |          |          |         |          |         |          |          |
|                  |                                | TL-87-1          | TL-87-2  | TL-87-3  | TL-87-4 | TL-87-5  | TL-87-6 | TL-87-7  | TL-87-8  |
| Oxyde<br>en %wt  | SiO <sub>2</sub>               | 34,0594          | 34,5368  | 38,3449  | 34,8612 | 33,6526  | 37,1285 | 30,9624  | 36,5046  |
|                  | TiO <sub>2</sub>               | 2,8689           | 3,7172   | 1,576    | 2,8113  | 1,6798   | 0,3591  | 2,6322   | 0,5321   |
|                  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 33,9619          | 33,4008  | 30,92    | 33,2219 | 36,796   | 35,0219 | 33,9092  | 33,4662  |
|                  | FeO                            | 6,2061           | 5,5038   | 5,329    | 6,2159  | 5,0796   | 3,7064  | 6,4983   | 5,0491   |
|                  | MgO                            | 6,4841           | 6,6928   | 5,8168   | 6,6854  | 7,0431   | 5,8999  | 6,4705   | 6,5789   |
|                  | MnO                            | 0,0275           | 0,0242   | 0,0266   | 0,0214  | 0,0166   | 0,0208  | 0,1121   | 0,024    |
|                  | CaO                            | 1,1094           | 0,9284   | 1,1587   | 0,8436  | 0,9685   | 0,5707  | 5,5285   | 1,3967   |
|                  | Na <sub>2</sub> O              | 1,9937           | 1,7279   | 1,8628   | 1,7265  | 1,6327   | 2,8073  | 1,7949   | 2,2012   |
|                  | K <sub>2</sub> O               | 0,0065           | 0,0059   | 0,0103   | 0,0159  | 0,01     | 0,0049  | 0,0046   | 0,0141   |
|                  | Li <sub>2</sub> O              | 0,0019           | 0,0019   | 0,0019   | 0,0025  | 0,002    | 0,0012  | 0,0019   | 0,0017   |
|                  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,0099           | 0,0037   | 0,0127   | 0,0111  | 0,0067   | 0,0128  | 0,0215   | 0,0079   |
|                  | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 9,8665           | 10,0048  | 11,108   | 10,0988 | 9,7487   | 10,7556 | 8,9694   | 10,5749  |
|                  | H <sub>2</sub> O               | 3,4042           | 3,4519   | 3,8325   | 3,4843  | 3,3635   | 3,711   | 3,0947   | 3,6486   |
|                  | ZnO                            | 0,0112           | 0,01     | 0,0111   | 0,0112  | 0,0069   | 0,0116  | 0,0178   | 0,0073   |
| Majeur<br>en ppm | Si                             | 169800           | 169800   | 169800   | 169800  | 169800   | 169800  | 169800   | 169800   |
|                  | Na                             | 15774,42         | 13482,12 | 13091,58 | 13346,2 | 13074,6  | 20376   | 15621,6  | 16249,86 |
|                  | Ca                             | 8456,04          | 6978,78  | 7844,76  | 6282,6  | 7471,2   | 3990,3  | 46355,4  | 9933,3   |
|                  | Mg                             | 41702,88         | 42450    | 33229,86 | 42008,5 | 45846    | 34809   | 45778,08 | 39478,5  |
|                  | Fe                             | 51449,4          | 44997    | 39240,78 | 50345,7 | 42619,8  | 28186,8 | 59260,2  | 39054    |
|                  | Al                             | 191704,2         | 185931   | 155027,4 | 183214  | 210212,4 | 181346  | 210552   | 176252,4 |
|                  | K                              | 57,3924          | 51,4494  | 80,655   | 137,538 | 89,994   | 39,7332 | 44,6574  | 116,6526 |
|                  | Ti                             | 18338,4          | 23432,4  | 8948,46  | 17557,3 | 10867,2  | 2105,52 | 18508,2  | 3173,562 |
|                  | Cr                             | 72,165           | 26,319   | 82,0134  | 78,957  | 49,242   | 85,4094 | 172,6866 | 53,487   |
|                  | Mn                             | 227,532          | 196,968  | 195,27   | 173,02  | 138,8964 | 157,914 | 1018,8   | 185,082  |

| Échantillon         |        | Lamaque          |         |          |         |         |         |          |         |
|---------------------|--------|------------------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|
|                     |        | Zone Triangle 87 |         |          |         |         |         |          |         |
|                     |        | TL-87-1          | TL-87-2 | TL-87-3  | TL-87-4 | TL-87-5 | TL-87-6 | TL-87-7  | TL-87-8 |
| Traces<br>en<br>ppm | Co     | 19,3063          | 27,3378 | 23,6871  | 23,3475 | 36,1674 | 0,3549  | 33,4506  | 28,7811 |
|                     | Li     | 9,2541           | 9,2201  | 8,2183   | 11,9879 | 10,2559 | 5,4506  | 10,3578  | 7,7768  |
|                     | Be     | 7,8617           | 0,866   | 4,8563   | 5,094   | 0,6283  | 0,2887  | 1,3584   | 4,4657  |
|                     | Sc     | 40,0728          | 32,4318 | 32,7544  | 34,5373 | 29,6301 | 14,1274 | 53,6568  | 31,0734 |
|                     | Ni     | 71,6556          | 31,0734 | 36,1674  | 33,7902 | 41,4312 | 11,037  | 55,5246  | 33,2808 |
|                     | Cu     | 4,3299           | 6,4864  | 3,0394   | 4,8393  | 6,0109  | 4,1261  | 4,0412   | 4,5846  |
|                     | V      | 740,328          | 736,932 | 607,3746 | 669,01  | 594,3   | 163,17  | 809,946  | 601,092 |
|                     | Zn     | 89,8242          | 80,655  | 89,3148  | 90,3336 | 55,3548 | 93,5598 | 143,1414 | 58,9206 |
|                     | Ga     | 23,6362          | 25,2493 | 18,7969  | 22,1929 | 22,8551 | 30,564  | 29,3584  | 21,2759 |
|                     | Rb     | 0,1307           | 0,124   | 0,3107   | 0,5569  | 0,3939  | 0,163   | 0,1019   | 0,4415  |
|                     | Sr     | 665,616          | 514,494 | 516,5316 | 640,146 | 480,534 | 110,2   | 708,066  | 772,59  |
|                     | Y      | 4,4148           | 1,8678  | 0,7641   | 5,6204  | 10,8672 | 4,245   | 8,7277   | 0,2853  |
|                     | Zr     | 69,618           | 88,4658 | 10,8842  | 264,888 | 99,5028 | 0,6792  | 202,062  | 5,0431  |
|                     | Nb     | 6,9618           | 12,735  | 3,1073   | 8,4221  | 4,7035  | 1,9527  | 7,9466   | 0,1426  |
|                     | Mo     | 0                | 0       | 0,0577   | 0       | 0       | 0,0577  | 0,0408   | 0       |
|                     | Ag     | 0,0832           | 0,1172  | 0,073    | 0,1358  | 0,1172  | 0,1172  | 0,1477   | 0,1324  |
|                     | Cd     | 0,124            | 0,1206  | 0,6792   | 0,1358  | 0,0883  | 0,1715  | 0,7301   | 0,0136  |
|                     | In     | 0,0219           | 0,0318  | 0,0228   | 0,0299  | 0,0399  | 0,0662  | 0,0645   | 0,0265  |
|                     | Sn     | 0,7981           | 1,2735  | 0,4686   | 1,3346  | 0,8965  | 1,5622  | 1,0375   | 0,5213  |
|                     | Sb     | 1,3584           | 1,681   | 0,6622   | 1,0307  | 0,6113  | 0,0526  | 1,9697   | 0,0832  |
|                     | Cs     | 0,0068           | 0       | 0,0192   | 0,0214  | 0,0073  | 0,0104  | 0,0083   | 0,0017  |
|                     | Ba     | 0,7132           | 0,4924  | 1,2226   | 1,715   | 2,3263  | 1,2735  | 0,6622   | 2,0376  |
|                     | Hf     | 1,9357           | 3,0734  | 0,3124   | 8,0655  | 2,6659  | 0,0458  | 5,5694   | 0,129   |
|                     | W      | 39,2238          | 50,6004 | 16,98    | 42,2802 | 17,6592 | 2,2244  | 46,8648  | 0,4058  |
|                     | Au     | -0,0068          | 0,0509  | 0,0645   | 0,0221  | 0,0475  | 0,073   | 0,0425   | 0,0526  |
|                     | Tl     | 0,0192           | 0,0121  | 0,0073   | 0,016   | 0,0161  | 0,0141  | 0,0141   | 0,0022  |
|                     | Pb     | 11,8011          | 10,7653 | 9,339    | 11,3087 | 9,5088  | 4,0752  | 12,718   | 13,7029 |
| Bi                  | 0,1987 | 0,2207           | 0,1715  | 0,2224   | 0,2394  | 0,1715  | 0,1783  | 0,1562   |         |
| Th                  | 0,18   | 0,1409           | 0,0917  | 0,3854   | 0,0764  | 0,7301  | 0,4975  | 0,0138   |         |
| U                   | 0,2106 | 0,2598           | 0,0632  | 0,4364   | 0,1138  | 0,0543  | 0,377   | 0,0182   |         |

| Échantillon               |    | Lamaque          |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|----|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |    | Zone Triangle 87 |         |         |         |         |         |         |         |
|                           |    | TL-87-1          | TL-87-2 | TL-87-3 | TL-87-4 | TL-87-5 | TL-87-6 | TL-87-7 | TL-87-8 |
| Terres<br>Rares<br>en ppm | La | 0,4075           | 0,0492  | 0,073   | 0,0747  | 0,0985  | 2,6149  | 1,0358  | 0,0934  |
|                           | Ce | 1,1716           | 0,3056  | 0,1715  | 0,2139  | 0,4653  | 6,792   | 2,6659  | 0,1104  |
|                           | Pr | 0,1409           | 0,028   | 0,0246  | 0,0363  | 0,1121  | 0,7811  | 0,3905  | 0,0187  |
|                           | Nd | 0,9848           | 0,3396  | 0,1155  | 0,2055  | 0,7301  | 3,8884  | 1,7829  | 0,0662  |
|                           | Sm | 0,2496           | 0,1494  | 0,0272  | 0,1053  | 0,6622  | 0,815   | 0,883   | 0,056   |
|                           | Eu | 0,1885           | 0,1528  | 0,1392  | 0,1206  | 0,2479  | 0,1715  | 0,4432  | 0,1477  |
|                           | Gd | 0,472            | 0,2547  | 0,0611  | 0,2955  | 0,9509  | 0,7811  | 1,3924  | 0,0153  |
|                           | Tb | 0,1053           | 0,0374  | 0,0153  | 0,0815  | 0,2156  | 0,1341  | 0,2462  | 0,0037  |
|                           | Dy | 0,815            | 0,2819  | 0,1511  | 0,6418  | 1,8338  | 0,883   | 1,698   | 0,0543  |
|                           | Ho | 0,1715           | 0,1121  | 0,0374  | 0,2309  | 0,3362  | 0,1902  | 0,3005  | 0,0037  |
|                           | Er | 0,5705           | 0,3209  | 0,0866  | 0,8066  | 1,1716  | 0,4585  | 1,3244  | 0,0306  |
|                           | Tm | 0,0815           | 0,0425  | 0,0146  | 0,1732  | 0,1936  | 0,0832  | 0,2139  | 0,0048  |
|                           | Yb | 0,7301           | 0,4924  | 0,163   | 1,5842  | 1,2565  | 0,4245  | 1,7659  | 0,0272  |
|                           | Lu | 0,1206           | 0,0594  | 0,0136  | 0,2683  | 0,1987  | 0,0425  | 0,3413  | 0,0024  |

| Échantillon      |                                | Lamaque          |          |          |          |          |          |          |          |
|------------------|--------------------------------|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                  |                                | Zone Triangle 85 |          |          |          |          |          |          |          |
|                  |                                | TL-85-1          | TL-85-2  | TL-85-3  | TL-85-4  | TL-85-5  | TL-85-6  | TL-85-7  | TL-85-8  |
| Oxyde<br>en %wt  | SiO <sub>2</sub>               | 35,4479          | 34,2814  | 35,9106  | 33,016   | 34,1302  | 35,2793  | 35,3752  | 34,4708  |
|                  | TiO <sub>2</sub>               | 0,4755           | 0,3572   | 0,3829   | 3,9655   | 0,4632   | 0,8255   | 0,4354   | 2,3658   |
|                  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 35,2212          | 37,2413  | 34,9515  | 35,5167  | 37,2579  | 35,9261  | 35,7426  | 35,1332  |
|                  | FeO                            | 5,1396           | 5,3168   | 4,7791   | 5,0073   | 4,8336   | 4,4829   | 4,9354   | 4,6019   |
|                  | MgO                            | 7,0672           | 6,7815   | 7,1232   | 6,7717   | 7,069    | 7,1375   | 7,0198   | 7,1342   |
|                  | MnO                            | 0,0113           | 0,0118   | 0,0102   | 0,0105   | 0,0101   | 0,0119   | 0,011    | 0,0123   |
|                  | CaO                            | 0,5854           | 0,6233   | 0,614    | 0,5522   | 0,546    | 0,4961   | 0,627    | 0,6876   |
|                  | Na <sub>2</sub> O              | 2,2179           | 2,0197   | 2,2265   | 2,2135   | 2,2495   | 2,0851   | 2,0417   | 2,1025   |
|                  | K <sub>2</sub> O               | 0,0074           | 0,0069   | 0,0066   | 0,0059   | 0,006    | 0,0054   | 0,0061   | 0,0056   |
|                  | Li <sub>2</sub> O              | 0,0017           | 0,0018   | 0,0021   | 0,002    | 0,0018   | 0,0019   | 0,002    | 0,0019   |
|                  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,013            | 0,0011   | 0,0013   | 0,0747   | 0,1343   | 0,0023   | 0,0203   | 0,053    |
|                  | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 10,2688          | 9,9309   | 10,4028  | 9,5643   | 9,8871   | 10,2199  | 10,2477  | 9,9857   |
|                  | H <sub>2</sub> O               | 3,543            | 3,4264   | 3,5892   | 3,2999   | 3,4113   | 3,5261   | 3,5357   | 3,4453   |
|                  | ZnO                            | 0,0487           | 0,0516   | 0,0596   | 0,0685   | 0,0636   | 0,0571   | 0,0436   | 0,0666   |
| Majeur<br>en ppm | Si                             | 169800           | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   |
|                  | Na                             | 16861,14         | 15876,3  | 16708,32 | 18066,72 | 17761,08 | 15927,24 | 15553,68 | 16436,64 |
|                  | Ca                             | 4287,45          | 4720,44  | 4438,57  | 4341,79  | 4153,31  | 3650,7   | 4601,58  | 5178,9   |
|                  | Mg                             | 43672,56         | 43332,96 | 43451,82 | 44929,08 | 45370,56 | 44317,8  | 43468,8  | 45336,6  |
|                  | Fe                             | 40938,78         | 43791,42 | 37576,74 | 42823,56 | 39987,9  | 35878,74 | 39393,6  | 37695,6  |
|                  | Al                             | 191025           | 208854   | 187119,6 | 206816,4 | 209872,8 | 195779,4 | 194251,2 | 195949,2 |
|                  | K                              | 63               | 60,45    | 55,12    | 54,29    | 53,32    | 46,53    | 52,3     | 49,41    |
|                  | Ti                             | 2920,56          | 2268,53  | 2321,17  | 26149,2  | 2954,52  | 5094     | 2679,44  | 14942,4  |
|                  | Cr                             | 91,35            | 7,81     | 9,34     | 562,04   | 978,05   | 15,96    | 142,63   | 382,05   |
|                  | Mn                             | 89,99            | 97,13    | 79,81    | 89,65    | 83,37    | 94,58    | 87,45    | 100,52   |

| Échantillon         |    | Lamaque          |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------|----|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                     |    | Zone Triangle 85 |         |         |         |         |         |         |         |
|                     |    | TL-85-1          | TL-85-2 | TL-85-3 | TL-85-4 | TL-85-5 | TL-85-6 | TL-85-7 | TL-85-8 |
| Traces<br>en<br>ppm | Co | 1,9018           | 4,9412  | 0,5824  | 1,1207  | 1,3754  | 1,2565  | 1,9018  | 0,9067  |
|                     | Li | 8,0146           | 8,9485  | 9,9673  | 10,1031 | 9,1183  | 9,0843  | 9,4069  | 9,4579  |
|                     | Be | 0,9509           | 0,7301  | 0,7811  | 0,9169  | 0,4585  | 0,7132  | 0,6452  | 0,6792  |
|                     | Sc | 50,4306          | 59,7696 | 75,7308 | 88,9752 | 63,3354 | 60,9582 | 41,9406 | 101,031 |
|                     | Ni | 25,8096          | 43,299  | 17,1838 | 16,3008 | 20,6477 | 16,9291 | 37,6956 | 17,6592 |
|                     | Cu | 4,9072           | 3,0904  | 4,0243  | 5,96    | 4,3129  | 5,1449  | 4,6016  | 4,5846  |
|                     | V  | 469,327          | 437,065 | 504,815 | 618,072 | 474,251 | 477,138 | 438,084 | 565,434 |
|                     | Zn | 391,389          | 414,482 | 478,836 | 550,152 | 511,098 | 458,46  | 350,297 | 534,87  |
|                     | Ga | 39,1219          | 35,7259 | 42,0764 | 44,997  | 41,3123 | 41,2614 | 38,0522 | 45,5064 |
|                     | Rb | 0,0256           | 0,0319  | 0,0377  | 0,0205  | 0,034   | 0,0357  | 0,0238  | 0,0357  |
|                     | Sr | 621,468          | 619,77  | 584,791 | 584,112 | 592,602 | 421,104 | 599,394 | 616,374 |
|                     | Y  | 2,581            | 0,0216  | 0,6673  | 10,5276 | 3,0734  | 3,0904  | 0,4788  | 5,5525  |
|                     | Zr | 159,612          | 0,188   | 24,112  | 579,018 | 146,028 | 149,424 | 31,413  | 139,236 |
|                     | Nb | 0,4703           | 0       | 0,0492  | 20,7156 | 0,6181  | 2,6319  | 0,124   | 10,0182 |
|                     | Mo | 0,017            | 0       | 0,0357  | 0,0526  | 0,0543  | 0       | 0       | 0       |
|                     | Ag | 0,2156           | 0,0662  | 0,0543  | 0,2377  | 0,1155  | 0,0832  | 0,0934  | 0,1172  |
|                     | Cd | 0,1053           | 0,1121  | 0,3277  | 0,4449  | 0,3905  | 0,1596  | 0,1511  | 0,3396  |
|                     | In | 0,0513           | 0,0474  | 0,0455  | 0,062   | 0,0255  | 0,0435  | 0,0336  | 0,056   |
|                     | Sn | 0,6537           | 0,3634  | 0,6792  | 2,2923  | 0,399   | 0,815   | 0,5298  | 1,5452  |
|                     | Sb | 0,2156           | 0,0815  | 0,1783  | 3,7186  | 0,18    | 0,5841  | 0,1121  | 1,3754  |
|                     | Cs | 0                | 0,0053  | 0,0093  | 0,0107  | 0,0075  | 0       | 0       | 0,0126  |
|                     | Ba | 0,3905           | 0,4143  | 1,3924  | 1,4093  | 0,6283  | 0,6181  | 0,1885  | 2,1395  |
|                     | Hf | 4,6865           | 0       | 0,6503  | 16,8442 | 4,5167  | 3,4469  | 0,849   | 4,0752  |
|                     | W  | 4,7714           | 0,0051  | 0,5773  | 146,028 | 4,5506  | 20,7156 | 1,2056  | 73,014  |
|                     | Au | 0,1223           | 0,034   | 0       | 0,0204  | 0       | 0,0272  | 0,0323  | 0       |
|                     | Tl | 0,0044           | 0,0054  | 0,007   | 0,008   | 0,0124  | 0,0117  | 0,0068  | 0,0092  |
|                     | Pb | 11,886           | 7,2165  | 10,8842 | 14,7217 | 11,6822 | 8,9485  | 10,4087 | 14,6537 |
|                     | Bi | 0,2309           | 0,1375  | 0,0931  | 0,1545  | 0,2156  | 0,2139  | 0,3566  | 0,0849  |
|                     | Th | 0,2598           | 0       | 0,0815  | 1,5112  | 0,3413  | 0,2887  | 0,056   | 0,4534  |
|                     | U  | 0,5417           | 0       | 0,107   | 3,0224  | 0,8235  | 0,6317  | 0,163   | 1,6471  |

| Échantillon                  |    | Lamaque          |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------------------|----|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                              |    | Zone Triangle 85 |         |         |         |         |         |         |         |
|                              |    | TL-85-1          | TL-85-2 | TL-85-3 | TL-85-4 | TL-85-5 | TL-85-6 | TL-85-7 | TL-85-8 |
| Terres<br>Rares<br>en<br>ppm | La | 0,1409           | 0,0628  | 0,0934  | 1,2395  | 0,146   | 0,2309  | 0,0577  | 0,7641  |
|                              | Ce | 0,2123           | 0,163   | 0,2394  | 3,1753  | 0,2072  | 0,4245  | 0,1341  | 2,3602  |
|                              | Pr | 0,0245           | 0,0115  | 0,0458  | 0,4483  | 0,0333  | 0,0951  | 0,0178  | 0,377   |
|                              | Nd | 0,1206           | 0,1257  | 0,1223  | 2,2244  | 0,1172  | 0,3804  | 0,0628  | 2,1225  |
|                              | Sm | 0,0408           | 0       | 0,0611  | 0,7301  | 0,0441  | 0,129   | 0       | 0,832   |
|                              | Eu | 0,1121           | 0,1155  | 0,0985  | 0,3175  | 0,1036  | 0,1868  | 0,1121  | 0,2988  |
|                              | Gd | 0,1477           | 0,0102  | 0,0357  | 0,832   | 0,1053  | 0,1834  | 0       | 0,883   |
|                              | Tb | 0,0319           | 0       | 0,0088  | 0,1596  | 0,0302  | 0,0492  | 0,0073  | 0,1443  |
|                              | Dy | 0,1987           | 0,0053  | 0,0577  | 1,1886  | 0,2988  | 0,3481  | 0,0425  | 1,0697  |
|                              | Ho | 0,0747           | 0       | 0,0267  | 0,4177  | 0,1121  | 0,1155  | 0,0153  | 0,219   |
|                              | Er | 0,4619           | 0       | 0,1019  | 1,7489  | 0,5773  | 0,4211  | 0,0458  | 0,6622  |
|                              | Tm | 0,0844           | 0       | 0,0222  | 0,3345  | 0,1053  | 0,0934  | 0,0221  | 0,1494  |
|                              | Yb | 0,8269           | 0       | 0,2004  | 3,1413  | 0,9848  | 0,866   | 0,1664  | 1,2565  |
|                              | Lu | 0,1528           | 0       | 0,0295  | 0,6045  | 0,2292  | 0,1409  | 0,0324  | 0,2632  |



| Échantillon      |                                | Lac Herbin |          |          |          |          |          |          |
|------------------|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                  |                                | TL-73-1    | TL-73-2  | TL-73-3  | TL-73-4  | TL-73-5  | TL-73-6  | TL-73-7  |
| Oxyde<br>en %wt  | SiO <sub>2</sub>               | 34,692     | 33,2479  | 33,6117  | 35,7311  | 36,6875  | 34,5925  | 35,0901  |
|                  | TiO <sub>2</sub>               | 0,414      | 0,2769   | 0,1051   | 0,2962   | 0,1711   | 0,2158   | 0,2512   |
|                  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 35,3587    | 37,851   | 37,6418  | 34,7768  | 34,8328  | 36,1738  | 35,5785  |
|                  | FeO                            | 6,4048     | 5,7183   | 6,2256   | 6,1239   | 5,9437   | 6,428    | 6,0457   |
|                  | MgO                            | 6,5615     | 7,2419   | 6,7402   | 6,2456   | 5,7758   | 6,3925   | 6,3077   |
|                  | MnO                            | 0,0142     | 0,0122   | 0,0126   | 0,0118   | 0,005    | 0,0123   | 0,0063   |
|                  | CaO                            | 0,7102     | 0,5893   | 0,2933   | 0,5398   | 0,2265   | 0,3941   | 0,3626   |
|                  | Na <sub>2</sub> O              | 2,3127     | 2,0949   | 2,2619   | 2,3392   | 2,0389   | 2,2995   | 2,2      |
|                  | K <sub>2</sub> O               | 0,013      | 0,0102   | 0,008    | 0,011    | 0,0059   | 0,0094   | 0,0075   |
|                  | Li <sub>2</sub> O              | 0,0013     | 0,0013   | 0,0013   | 0,0011   | 0,0013   | 0,0011   | 0,0012   |
|                  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,0004     | 0,0015   | 0,0024   | 0,0014   | 0,0166   | 0,0025   | 0,477    |
|                  | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 10,0498    | 9,6314   | 9,7368   | 10,3508  | 10,6279  | 10,021   | 10,1651  |
|                  | H <sub>2</sub> O               | 3,4674     | 3,3231   | 3,3595   | 3,5713   | 3,6669   | 3,4575   | 3,5072   |
|                  | ZnO                            | 0,0128     | 0,0072   | 0,0134   | 0,0118   | 0,0124   | 0,0142   | 0,012    |
| Majeur<br>en ppm | Si                             | 169800     | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   |
|                  | Na                             | 17964,84   | 16980    | 18134,64 | 17642,22 | 14976,36 | 17913,9  | 16895,1  |
|                  | Ca                             | 5314,74    | 4601,58  | 2265,132 | 3922,38  | 1602,912 | 2957,916 | 2682,84  |
|                  | Mg                             | 41431,2    | 47713,8  | 43927,26 | 38289,9  | 34486,38 | 40480,32 | 39376,62 |
|                  | Fe                             | 52128,6    | 48562,8  | 52298,4  | 48393    | 45744,12 | 52468,2  | 48647,7  |
|                  | Al                             | 195949,2   | 218872,2 | 215306,4 | 187119,6 | 182535   | 201043,2 | 194930,4 |
|                  | K                              | 113,426    | 92,711   | 71,825   | 92,541   | 48,733   | 81,844   | 64,354   |
|                  | Ti                             | 2597,94    | 1813,464 | 680,898  | 1804,974 | 1015,404 | 1358,4   | 1558,764 |
|                  | Cr                             | 2,717      | 10,867   | 17,999   | 9,848    | 112,747  | 17,829   | 3379,02  |
|                  | Mn                             | 115,294    | 103,408  | 105,616  | 92,541   | 38,714   | 99,842   | 50,6     |

| Échantillon      |    | Lac Herbin |         |          |         |          |         |         |
|------------------|----|------------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|
|                  |    | TL-73-1    | TL-73-2 | TL-73-3  | TL-73-4 | TL-73-5  | TL-73-6 | TL-73-7 |
| Traces<br>en ppm | Co | 16,5555    | 15,9782 | 23,806   | 15,5537 | 16,946   | 21,4797 | 44,4876 |
|                  | Li | 6,2656     | 6,3845  | 6,2826   | 4,9921  | 6,1128   | 5,2468  | 5,7902  |
|                  | Be | 2,1225     | 0,5264  | 0,4585   | 0,5773  | 1,0867   | 0,5434  | 0,9169  |
|                  | Sc | 33,79      | 42,45   | 97,47    | 58,58   | 30,28    | 97,13   | 49,24   |
|                  | Ni | 42,96      | 50,43   | 66,39    | 60,96   | 343,85   | 87,79   | 302,07  |
|                  | Cu | 6,6222     | 5,077   | 3,4809   | 3,362   | 4,0243   | 3,9394  | 6,0279  |
|                  | V  | 461,86     | 410,92  | 409,05   | 482,57  | 496,33   | 463,55  | 614,51  |
|                  | Zn | 102,73     | 57,56   | 107,82   | 94,75   | 99,33    | 114,11  | 96,62   |
|                  | Ga | 38,88      | 39,56   | 42,08    | 43,3    | 32,5     | 43,3    | 40,92   |
|                  | Rb | 0,0645     | 0,0458  | 0,0509   | 0,0408  | 0,0423   | 0,0645  | 0,034   |
|                  | Sr | 908,43     | 964,464 | 316,5072 | 684,294 | 261,3222 | 419,406 | 341,298 |
|                  | Y  | 0,0747     | 0,0628  | 0        | 0       | 0,2462   | 0,0204  | 0,3854  |
|                  | Zr | 0,4245     | 1,5282  | 0,0866   | 0,0611  | 0,2173   | 0,3226  | 14,7726 |
|                  | Nb | 0,0082     | 0       | 0        | 0       | 0        | 0       | 0       |
|                  | Mo | 0,0272     | 0       | 0        | 0       | 0        | 0,1358  | 0       |
|                  | Ag | 0,0662     | 0,4585  | 0,0306   | 0,0391  | 0,0815   | 0,0832  | 0,0883  |
|                  | Cd | 0,5434     | 0,2377  | 0,2072   | 0,1087  | 0,1155   | 0,0951  | 0,1036  |
|                  | In | 0,1043     | 0,1002  | 0,146    | 0,1155  | 0,0615   | 0,1392  | 0,0645  |
|                  | Sn | 1,715      | 1,6131  | 2,7847   | 2,2838  | 0,6232   | 3,2602  | 0,7471  |
|                  | Sb | 0,0611     | 0,1189  | 0,017    | 0,107   | 0,0289   | 0,1307  | 0,0696  |
|                  | Cs | 0,0063     | 0       | 0,0032   | 0       | 0,0119   | 0,0042  | 0       |
|                  | Ba | 0,9848     | 1,3075  | 0,3107   | 1,4263  | 3,5488   | 0,7811  | 0,3566  |
|                  | Hf | 0,0085     | 0,0238  | 0        | 0       | 0        | 0,0187  | 0,2683  |
|                  | W  | 0,0492     | 0       | 0,0048   | 0,0543  | 0,1172   | 0       | 0,0102  |
|                  | Au | 0,0441     | 0,1223  | 0        | 0       | 0,0051   | 0,0425  | 0       |
|                  | Tl | 0,0122     | 0,0104  | 0,0042   | 0,0036  | 0,0066   | 0,0126  | 0,0124  |
|                  | Pb | 5,094      | 4,1431  | 1,9035   | 2,5725  | 1,5112   | 3,5149  | 1,4603  |
|                  | Bi | 0,2173     | 0,45    | 0,163    | 0,1681  | 0,1336   | 0,1681  | 0,1448  |
|                  | Th | 0,0391     | 0,0163  | 0,0061   | 0,0119  | 0,0333   | 0,0255  | 0,1019  |
|                  | U  | 0,0095     | 0,0221  | 0        | 0,0073  | 0,0134   | 0,0138  | 0,146   |

| Échantillon               |    | Lac Herbin |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|----|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |    | TL-73-1    | TL-73-2 | TL-73-3 | TL-73-4 | TL-73-5 | TL-73-6 | TL-73-7 |
| Terres<br>Rares<br>en ppm | La | 0,1783     | 0,1715  | 0,0425  | 0,0985  | 0,0815  | 0,1341  | 0,0221  |
|                           | Ce | 0,4415     | 0,3175  | 0,0628  | 0,2632  | 0,2564  | 0,1851  | 0,1002  |
|                           | Pr | 0,056      | 0,0374  | 0,0015  | 0,0425  | 0,0248  | 0,0078  | 0,0095  |
|                           | Nd | 0,1358     | 0,2887  | 0       | 0,2377  | 0,1307  | 0,0221  | 0,0696  |
|                           | Sm | 0,034      | 0       | 0       | 0       | 0       | 0,0238  | 0       |
|                           | Eu | 0,2581     | 0,197   | 0,0968  | 0,1664  | 0,0594  | 0,1155  | 0,0951  |
|                           | Gd | 0          | 0       | 0       | 0,0594  | 0,0408  | 0       | 0,0238  |
|                           | Tb | 0,0027     | 0       | 0       | 0       | 0,0102  | 0       | 0,02    |
|                           | Dy | 0          | 0       | 0       | 0       | 0,0526  | 0,0136  | 0,107   |
|                           | Ho | 0,0025     | 0       | 0       | 0,0068  | 0,0056  | 0       | 0,0306  |
|                           | Er | 0,0204     | 0       | 0       | 0       | 0,0214  | 0       | 0,0306  |
|                           | Tm | 0,0037     | 0       | 0       | 0       | 0,0078  | 0       | 0,0048  |
|                           | Yb | 0          | 0       | 0       | 0       | 0,0357  | 0,0272  | 0,0747  |
|                           | Lu | 0          | 0       | 0       | 0       | 0,0037  | 0,002   | 0,0151  |

| Échantillon      |                                | Beaufor  |          |          |          |          |          |          |          |
|------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                  |                                | TL-10-1  | TL-10-2  | TL-10-3  | TL-10-4  | TL-10-5  | TL-10-6  | TL-10-7  | TL-10-8  |
| Oxyde<br>en %wt  | SiO <sub>2</sub>               | 34,9011  | 35,0637  | 34,8305  | 35,3358  | 34,6366  | 34,7134  | 34,7967  | 33,995   |
|                  | TiO <sub>2</sub>               | 0,6533   | 0,4838   | 0,5189   | 0,1282   | 0,1742   | 0,4627   | 0,2049   | 0,4958   |
|                  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 34,2155  | 34,5917  | 34,7     | 35,4844  | 36,3423  | 35,3499  | 36,5718  | 35,9393  |
|                  | FeO                            | 6,2398   | 6,0601   | 6,0868   | 5,6864   | 5,728    | 6,1374   | 5,629    | 6,1739   |
|                  | MgO                            | 7,3288   | 7,2297   | 7,2924   | 7,0859   | 7,0343   | 6,8615   | 6,8106   | 7,1675   |
|                  | MnO                            | 0,0141   | 0,0142   | 0,0136   | 0,0109   | 0,0158   | 0,0142   | 0,0121   | 0,0126   |
|                  | CaO                            | 0,6451   | 0,5926   | 0,6424   | 0,2981   | 0,3403   | 0,6357   | 0,3177   | 0,6026   |
|                  | Na <sub>2</sub> O              | 2,3882   | 2,28     | 2,3285   | 2,1753   | 2,2174   | 2,2791   | 2,0895   | 2,3434   |
|                  | K <sub>2</sub> O               | 0,0129   | 0,0159   | 0,0131   | 0,0084   | 0,0117   | 0,0146   | 0,008    | 0,012    |
|                  | Li <sub>2</sub> O              | 0,0008   | 0,0007   | 0,0007   | 0,0007   | 0,0007   | 0,0009   | 0,0008   | 0,0008   |
|                  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,0018   | 0,0055   | 0,0019   | 0,0178   | 0,0031   | 0,005    | 0,001    | 0,0115   |
|                  | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 10,1104  | 10,1575  | 10,0899  | 10,2363  | 10,0337  | 10,056   | 10,0801  | 9,8479   |
|                  | H <sub>2</sub> O               | 3,4883   | 3,5046   | 3,4813   | 3,5318   | 3,4619   | 3,4696   | 3,4779   | 3,3978   |
|                  | ZnO                            | 0,0074   | 0,0069   | 0,0077   | 0,0114   | 0,0091   | 0,0109   | 0,0104   | 0,0088   |
| Majeur<br>en ppm | Si                             | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   | 169800   |
|                  | Na                             | 18440,28 | 17523,36 | 18015,78 | 16589,46 | 17251,68 | 17693,16 | 16181,94 | 18576,12 |
|                  | Ca                             | 4798,548 | 4387,632 | 4788,36  | 2190,42  | 2550,396 | 4754,4   | 2370,408 | 4601,58  |
|                  | Mg                             | 45998,82 | 45166,8  | 45862,98 | 43927,26 | 44487,6  | 43299    | 42874,5  | 46185,6  |
|                  | Fe                             | 50481,54 | 48800,52 | 49343,88 | 45438,48 | 46695    | 49921,2  | 45676,2  | 51279,6  |
|                  | Al                             | 188478   | 189666,6 | 191534,4 | 193062,6 | 201722,4 | 195779,4 | 202062   | 203250,6 |
|                  | K                              | 111,0492 | 136,8588 | 113,4264 | 71,316   | 101,7102 | 126,8406 | 68,9388  | 106,8042 |
|                  | Ti                             | 4075,2   | 3003,762 | 3243,18  | 789,57   | 1095,21  | 2901,882 | 1281,99  | 3175,26  |
|                  | Cr                             | 12,5652  | 39,2238  | 13,7538  | 125,4822 | 22,2438  | 35,9976  | 7,1316   | 84,2208  |
|                  | Mn                             | 113,4264 | 113,5962 | 109,6908 | 86,9376  | 128,7084 | 114,7848 | 97,8048  | 104,0874 |

| Échantillon     |    | Beaufor |          |         |          |         |         |          |         |
|-----------------|----|---------|----------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|
|                 |    | TL-10-1 | TL-10-2  | TL-10-3 | TL-10-4  | TL-10-5 | TL-10-6 | TL-10-7  | TL-10-8 |
| Trace<br>en ppm | Co | 8,1504  | 6,4524   | 8,4391  | 2,2074   | 4,5167  | 3,4639  | 5,8581   | 5,1449  |
|                 | Li | 3,7526  | 3,4537   | 3,4469  | 3,2941   | 3,5998  | 4,1601  | 3,7016   | 3,9224  |
|                 | Be | 0,6962  | 0,3226   | 1,4942  | 0,2377   | 0,832   | 2,8357  | 0,4415   | 0,5094  |
|                 | Sc | 77,0892 | 31,1074  | 36,507  | 73,863   | 36,6768 | 23,8739 | 23,789   | 50,091  |
|                 | Ni | 42,9594 | 39,3936  | 34,9788 | 65,5428  | 57,2226 | 58,581  | 67,5804  | 48,9024 |
|                 | Cu | 2,3942  | 4,4148   | 2,6659  | 2,6659   | 3,7016  | 3,0394  | 2,581    | 3,413   |
|                 | V  | 821,832 | 679,0302 | 672,408 | 453,8754 | 545,058 | 614,676 | 492,42   | 708,066 |
|                 | Zn | 59,7696 | 55,6944  | 61,8072 | 91,5222  | 73,1838 | 87,7866 | 83,5416  | 70,6368 |
|                 | Ga | 38,7653 | 33,5185  | 33,8411 | 36,3542  | 34,0109 | 35,0467 | 31,5828  | 38,0352 |
|                 | Rb | 0,0509  | 0,073    | 0,0173  | 0,0338   | 0,0492  | 0,0441  | 0,0441   | 0,034   |
|                 | Sr | 777,684 | 742,3656 | 903,336 | 302,4138 | 390,54  | 920,316 | 333,1476 | 743,724 |
|                 | Y  | 0,1579  | 0,0083   | 0       | 0,0024   | 0,0248  | 0,0087  | 0,0102   | 0,0141  |
|                 | Zr | 0,0577  | 0,4873   | 0,0063  | 0,1257   | 0,1766  | 0,3566  | 0,146    | 0,6452  |
|                 | Nb | 1,9527  | 0,0158   | 0       | 0        | 0,0029  | 0,0119  | 0,0374   | 0,0272  |
|                 | Mo | 0       | 0,0441   | 0       | 0,0136   | 0       | 0       | 0        | 0       |
|                 | Ag | 0,0374  | 0,073    | 0,0272  | 0,0425   | 0,0408  | 0,034   | 0,0611   | 0,0832  |
|                 | Cd | 0,2139  | 0,0917   | 0,1766  | 0,0951   | 0,2224  | 0,1817  | 0,1511   | 0,0306  |
|                 | In | 0,0812  | 0,0625   | 0,0642  | 0,0866   | 0,0941  | 0,0586  | 0,0849   | 0,0635  |
|                 | Sn | 3,1073  | 3,2771   | 2,2753  | 2,0885   | 2,2583  | 1,9687  | 2,4791   | 2,2923  |
|                 | Sb | 0,0492  | 0,0645   | 0,0611  | 0        | 0,0679  | 0,0645  | 0,0985   | 0,0526  |
|                 | Cs | 0,0025  |          | 0       | 0        | 0,008   | 0       | 0        | 0       |
|                 | Ba | 1,7999  | 1,4093   | 1,3754  | 0,4262   | 0,9169  | 2,0376  | 0,6283   | 0,9848  |
|                 | Hf | 0       | 0,0146   | 0       | 0,0228   | 0,0238  | 0,0102  | 0,056    | 0,0049  |
|                 | W  | 2,581   | 0,3651   | 0,0272  | 0,034    | 0,0934  | 0,0492  | 0,0306   | 0,056   |
|                 | Au | 0       | 0        | 0       | 0,0204   | 0       | 0,0289  | 0,2887   | 0       |
|                 | Tl | 0,0119  | 0,0076   | 0,0129  | 0,0092   | 0,007   | 0,0092  | 0,0187   | 0,0097  |
|                 | Pb | 3,6167  | 3,0819   | 3,4571  | 1,5231   | 1,5808  | 2,8866  | 2,513    | 2,9715  |
|                 | Bi | 0,0465  | 0,4551   | 0,053   | 0,0526   | 0,098   | 0,1494  | 0,1341   | 0,1087  |
|                 | Th | 0,0037  | 0,0034   | 0       | 0,0066   | 0,0148  | 0,1019  | 0,3396   | 0,0119  |
|                 | U  | 0,0025  | 0,0015   | 0,0025  | 0,0039   | 0,0049  | 0,0143  | 0,3566   | 0       |

| Échantillon               |    | Beaufor |         |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                           |    | TL-10-1 | TL-10-2 | TL-10-3 | TL-10-4 | TL-10-5 | TL-10-6 | TL-10-7 | TL-10-8 |
| Terres<br>Rares<br>en ppm | La | 0,0696  | 0,1104  | 0,0968  | 0,0168  | 0,0246  | 0,073   | 0,0408  | 0,0883  |
|                           | Ce | 0,1257  | 0,1834  | 0,2055  | 0,025   | 0,0475  | 0,2462  | 0,0747  | 0,1477  |
|                           | Pr | 0,0226  | 0,0158  | 0,0216  | 0       | 0       | 0,0299  | 0       | 0,0216  |
|                           | Nd | 0,0458  | 0,0764  | 0,0662  | 0       | 0       | 0,1681  | 0       | 0,0696  |
|                           | Sm | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
|                           | Eu | 0,1053  | 0,1358  | 0,1596  | 0,0273  | 0,0441  | 0,1206  | 0,0126  | 0,1206  |
|                           | Gd | 0,008   | 0,0041  | 0       | 0       | 0       | 0       | 0,0628  | 0       |
|                           | Tb | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
|                           | Dy | 0,0039  | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
|                           | Ho | 0,0046  | 0       | 0       | 0       | 0,0012  | 0,0037  | 0,0073  | 0       |
|                           | Er | 0,0032  | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
|                           | Tm | 0       | 0       | 0       | 0,0017  | 0       | 0,0015  | 0       | 0       |
|                           | Yb | 0,01    | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
|                           | Lu | 0       | 0       | 0       | 0,0048  | 0,0058  | 0       | 0,0115  | 0       |

**ANNEXE E**  
**RÉSULTATS DES ANALYSES ISOTOPIQUE POUR LE BORE**  
**DANS LES TOURMALINES (SIMS)**

| Date   | $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ | 1sd (‰) <sup>a</sup> | IMF <sup>b</sup> | $\delta^{11}\text{B}(\text{‰})$ <sup>c</sup> |
|--|-------------------------------|----------------------|------------------|--|
| <b>Dravite (<math>^{11}\text{B}/^{10}\text{B} = 4.017</math> et <math>\delta^{11}\text{B} = -6.6</math>)</b> |                               |                      |                  |  |
| 08/06/2016   | 3,93326                       | 0,14                 | 0,9792           | -7,1   |
| 08/06/2016   | 3,93234                       | 0,12                 | 0,9789           | -7,3   |
| 08/06/2016   | 3,9327                        | 0,13                 | 0,979            | -7,2   |
| 08/06/2016   | 3,93251                       | 0,16                 | 0,979            | -7,3   |
| 08/06/2016   | 3,93272                       | 0,11                 | 0,979            | -7,2   |
| 08/06/2016   | 3,93258                       | 0,13                 | 0,979            | -7,2   |
| 08/06/2016   | 3,93201                       | 0,17                 | 0,9789           | -7,4   |
| 08/06/2016   | 3,93203                       | 0,09                 | 0,9789           | -7,4   |
| 08/06/2016   | 3,93314                       | 0,14                 | 0,9791           | -7,1   |
| 08/06/2016   | 3,93402                       | 0,15                 | 0,9794           | -6,9   |
| 08/06/2016   | 3,93163                       | 0,13                 | 0,9788           | -7,5   |
| 08/06/2016   | 3,9336                        | 0,1                  | 0,9793           | -7   |
| 08/06/2016   | 3,93295                       | 0,13                 | 0,9791           | -7,1   |
| 08/06/2016   | 3,9341                        | 0,15                 | 0,9794           | -6,8   |
| 08/06/2016   | 3,93364                       | 0,14                 | 0,9793           | -7   |
| 08/06/2016   | 3,93473                       | 0,13                 | 0,9795           | -6,7   |
| 08/06/2016   | 3,93429                       | 0,11                 | 0,9794           | -6,8   |
| 08/06/2016   | 3,93368                       | 0,16                 | 0,9793           | -7   |
| 08/06/2016   | 3,93334                       | 0,15                 | 0,9792           | -7   |
|  | <b>Moyenne</b>                |                      | <b>0,9791</b>    | <b>-7,1</b>                                  |
| <b>Dravite (<math>^{11}\text{B}/^{10}\text{B} = 4.017</math> et <math>\delta^{11}\text{B} = -6.6</math>)</b> |                               |                      |                  |  |
| 09/06/2016   | 3,84298                       | 0,17                 | 0,9567           | -7,4   |
| 09/06/2016   | 3,84332                       | 0,16                 | 0,9568           | -7,3   |
| 09/06/2016   | 3,84486                       | 0,2                  | 0,9572           | -6,9   |
| 09/06/2016   | 3,84416                       | 0,19                 | 0,957            | -7,1   |
| 09/06/2016   | 3,8447                        | 0,14                 | 0,9571           | -7   |
| 09/06/2016   | 3,84354                       | 0,16                 | 0,9568           | -7,3   |
|  | <b>Moyenne</b>                |                      | <b>0,9569</b>    | <b>-7,2</b>                                  |



| Date   | $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ | 1sd (‰) <sup>a</sup> | IMF <sup>b</sup> | $\delta^{11}\text{B}(‰)$ <sup>c</sup> |
|--|-------------------------------|----------------------|------------------|---------------------------------------|
| <b>Schorl (<math>^{11}\text{B}/^{10}\text{B} = 3.993</math> et <math>\delta^{11}\text{B} = -12.5</math>)</b>   |                               |                      |                  |                                       |
| 08/06/2016   | 3,912831                      | 0,08                 | 0,9799           | -12,2                                 |
| 08/06/2016   | 3,913495                      | 0,09                 | 0,9801           | -12,1                                 |
| 08/06/2016   | 3,913083                      | 0,09                 | 0,98             | -12,2                                 |
| 08/06/2016   | 3,913686                      | 0,12                 | 0,9801           | -12                                   |
| 08/06/2016   | 3,913865                      | 0,12                 | 0,9802           | -12                                   |
| 08/06/2016   | 3,914048                      | 0,09                 | 0,9802           | -11,9                                 |
| 08/06/2016   | 3,914298                      | 0,11                 | 0,9803           | -11,8                                 |
| 08/06/2016   | 3,913426                      | 0,1                  | 0,98             | -12,1                                 |
| 08/06/2016   | 3,914147                      | 0,1                  | 0,9802           | -11,9                                 |
| 08/06/2016   | 3,914764                      | 0,13                 | 0,9804           | -11,7                                 |
| 08/06/2016   | 3,913796                      | 0,1                  | 0,9801           | -12                                   |
| 08/06/2016   | 3,91486                       | 0,13                 | 0,9804           | -11,7                                 |
| 08/06/2016   | 3,914355                      | 0,1                  | 0,9803           | -11,8                                 |
| 08/06/2016   | 3,914153                      | 0,08                 | 0,9802           | -11,9                                 |
| 08/06/2016   | 3,913661                      | 0,08                 | 0,9801           | -12                                   |
| 08/06/2016   | 3,914437                      | 0,12                 | 0,9803           | -11,8                                 |
|  | <b>Moyenne</b>                |                      | <b>0,9802</b>    | <b>-11,9</b>                          |
| 09/06/2016   | 3,82383                       | 0,15                 | 0,9576           | -12,4                                 |
| 09/06/2016   | 3,824835                      | 0,2                  | 0,9579           | -12,1                                 |
| 09/06/2016   | 3,824738                      | 0,14                 | 0,9578           | -12,1                                 |
| 09/06/2016   | 3,826482                      | 0,17                 | 0,9583           | -11,7                                 |
| 09/06/2016   | 3,826093                      | 0,16                 | 0,9582           | -11,8                                 |
| 09/06/2016   | 3,82407                       | 0,16                 | 0,9577           | -12,3                                 |
| 09/06/2016   | 3,823615                      | 0,17                 | 0,9576           | -12,4                                 |
| 09/06/2016   | 3,823509                      | 0,14                 | 0,9575           | -12,5                                 |
| 09/06/2016   | 3,8244                        | 0,2                  | 0,9578           | -12,2                                 |
| 09/06/2016   | 3,823763                      | 0,15                 | 0,9576           | -12,4                                 |
| 09/06/2016   | 3,824988                      | 0,17                 | 0,9579           | -12,1                                 |
| 09/06/2016   | 3,823129                      | 0,12                 | 0,9574           | -12,6                                 |
|  | <b>Moyenne</b>                |                      | <b>0,9578</b>    | <b>-12,2</b>                          |
| a) Individual uncertainty for 20 cycles (standard deviation / mean)*1000   |                               |                      |                  |                                       |
| b) Instrumental mass fractionation ( $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ measured / $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ RM)  |                               |                      |                  |                                       |
| c) Calculated from ratios corrected with average IMF values of 0.97963 (June 8) and 0.95749 (June 9) and $^{11}\text{B}/^{10}\text{B} = 4.04362$ for NBS SRM 951 |                               |                      |                  |                                       |

|                        |   |                                   |  |                          |             |          |                                  |
|------------------------|---|-----------------------------------|--|--------------------------|-------------|----------|----------------------------------|
| <b>GFZ<br/>Potsdam</b> | <b>Cameca 1280-HR</b>                                       |                                   | <b>LN2 no</b>  | <b>IMF, all<br/>runs</b> | <b>IMF</b>  | <b>n</b> | <b>Ext. Precision<br/>permil</b> |
| <b>16O-</b>            | <b>60 s nA preb.</b>  | <b>13.0 kV</b>                    |  | <b>June_8</b>            | 0,979<br>63 | 3<br>6   | 0,56                             |
| <b>10kV</b>            | <b>50V win 0Voffset<br/>5</b>                               | <b>M/dM=2<br/>000</b>             |  | <b>June_9</b>            | 0,957<br>49 | 1<br>8   | 0,48                             |
| <b>20 cycles</b>       | <b>4 blocks cyc/bl<br/>k<br/>multi-collection<br/>FC/FC</b> | <b>10B = 4s<br/><br/>11B = 2s</b> | <b>11B =<br/>110kHz<br/><br/>DeadTime EM =<br/>46.2 ns</b> |                          |             |          |                                  |

| Analysis Nr. | nA               | 11B/10B | 1 sd (permil) | 11/10B cor | $\delta^{11}\text{Bcor}$ | Int. Precision permil    |
|--------------|------------------|---------|---------------|------------|--------------------------|--------------------------|
| Beaufor 1    | 3,1462           | 3,925   | 0,13          | 4,0067     | -9,1                     | 1,34                     |
| Beaufor 2    | 3,1495           | 3,9259  | 0,1           | 4,0076     | -8,9                     | 1,04                     |
| Beaufor 3    | 3,1318           | 3,9261  | 0,1           | 4,0078     | -8,9                     | 1,04                     |
| Beaufor 4    | 3,1294           | 3,9235  | 0,12          | 4,0051     | -9,5                     | 1,2                      |
| Beaufor 5    | 3,1052           | 3,9239  | 0,12          | 4,0055     | -9,4                     | 1,17                     |
| Beaufor 6    | 3,0952           | 3,9175  | 0,12          | 3,999      | -11                      | 1,19                     |
| Beaufor 7    | 3,1121           | 3,9173  | 0,16          | 3,9987     | -11,1                    | 1,63                     |
| Beaufor 8    | 3,0722           | 3,9231  | 0,1           | 4,0047     | -9,6                     | 0,96                     |
| Beaufor 9    | 3,087            | 3,9243  | 0,11          | 4,0059     | -9,3                     | 1,11                     |
| Beaufor 10   | 3,0875           | 3,9229  | 0,09          | 4,0045     | -9,7                     | 0,95                     |
| Beaufor 11   | 3,0852           | 3,923   | 0,13          | 4,0046     | -9,6                     | 1,31                     |
| Beaufor 12   | 3,09             | 3,924   | 0,12          | 4,0056     | -9,4                     | 1,16                     |
| Beaufor 13   | 3,0872           | 3,918   | 0,15          | 3,9995     | -10,9                    | 1,49                     |
| Beaufor 14   | 3,0841           | 3,9168  | 0,15          | 3,9983     | -11,2                    | 1,46                     |
| Beaufor 15   | 3,0924           | 3,9195  | 0,15          | 4,001      | -10,5                    | 1,49                     |
| Beaufor 16   | 3,0947           | 3,9228  | 0,16          | 4,0044     | -9,7                     | 1,6                      |
|              | <b>Moyenne =</b> |         |               |            | <b>-9,9</b>              | <b>Écart type = 0,80</b> |

| Analysis Nr.     | nA     | 11B/10B | 1 sd (permil) | 11/10B cor | $\delta^{11}\text{Bcor}$ | Int. Precision permil    |
|------------------|--------|---------|---------------|------------|--------------------------|--------------------------|
| LacHerbin 1      | 3,2394 | 3,9276  | 0,1           | 4,0093     | -8,5                     | 0,97                     |
| LacHerbin 2      | 3,2337 | 3,9294  | 0,09          | 4,0112     | -8                       | 0,92                     |
| LacHerbin 3      | 3,1822 | 3,9297  | 0,09          | 4,0114     | -8                       | 0,92                     |
| LacHerbin 4      | 3,1349 | 3,9276  | 0,1           | 4,0093     | -8,5                     | 1,04                     |
| LacHerbin 5      | 3,1651 | 3,9243  | 0,09          | 4,0059     | -9,3                     | 0,94                     |
| LacHerbin 6      | 3,1741 | 3,9275  | 0,12          | 4,0091     | -8,5                     | 1,16                     |
| LacHerbin 7      | 3,1811 | 3,9271  | 0,14          | 4,0088     | -8,6                     | 1,38                     |
| LacHerbin 8      | 3,1709 | 3,9272  | 0,1           | 4,0089     | -8,6                     | 1,02                     |
| LacHerbin 9      | 3,1808 | 3,9299  | 0,13          | 4,0116     | -7,9                     | 1,28                     |
| LacHerbin 10     | 3,1703 | 3,9257  | 0,13          | 4,0073     | -9                       | 1,27                     |
| LacHerbin 11     | 3,0592 | 3,9307  | 0,12          | 4,0125     | -7,7                     | 1,25                     |
| LacHerbin 12     | 3,0287 | 3,9273  | 0,1           | 4,0089     | -8,6                     | 1,04                     |
| LacHerbin 13     | 3,0467 | 3,928   | 0,14          | 4,0097     | -8,4                     | 1,44                     |
| LacHerbin 14     | 3,0412 | 3,928   | 0,07          | 4,0097     | -8,4                     | 0,73                     |
| LacHerbin 15     | 3,0552 | 3,9257  | 0,13          | 4,0073     | -9                       | 1,35                     |
| LacHerbin 16     | 3,0335 | 3,9265  | 0,16          | 4,0082     | -8,8                     | 1,58                     |
| LacHerbin 17     | 2,9961 | 3,9289  | 0,11          | 4,0106     | -8,2                     | 1,11                     |
| LacHerbin 18     | 3,0011 | 3,9281  | 0,12          | 4,0098     | -8,4                     | 1,22                     |
| LacHerbin 19     | 2,9192 | 3,9272  | 0,12          | 4,0089     | -8,6                     | 1,19                     |
| LacHerbin 20     | 2,8878 | 3,9248  | 0,13          | 4,0064     | -9,2                     | 1,31                     |
| LacHerbin 21     | 2,8517 | 3,9277  | 0,11          | 4,0094     | -8,5                     | 1,14                     |
| Beauforl9 05     | 3,0017 | 3,8293  | 0,21          | 3,9993     | -10,9                    | 2,08                     |
| <b>Moyenne =</b> |        |         |               |            | <b>-8,5</b>              | <b>Écart type = 0,41</b> |
| 85 Lamaque 1     | 3,0012 | 3,8366  | 0,2           | 4,0069     | -9,1                     | 2,04                     |
| 85 Lamaque 2     | 3,0136 | 3,8252  | 0,15          | 3,995      | -12                      | 1,52                     |
| 85 Lamaque 3     | 2,9864 | 3,8268  | 0,18          | 3,9967     | -11,6                    | 1,8                      |
| 85 Lamaque 4     | 2,9819 | 3,8285  | 0,16          | 3,9985     | -11,2                    | 1,55                     |
| 85 Lamaque 5     | 2,9294 | 3,8238  | 0,16          | 3,9935     | -12,4                    | 1,63                     |
| 85 Lamaque 9     | 2,737  | 3,8286  | 0,2           | 3,9986     | -11,1                    | 2,02                     |
| 85 Lamaque 8     | 2,7016 | 3,8294  | 0,18          | 3,9994     | -10,9                    | 1,76                     |
| 85 Lamaque 7     | 2,7552 | 3,8306  | 0,24          | 4,0007     | -10,6                    | 2,35                     |
| 85 Lamaque 6     | 2,7182 | 3,8296  | 0,19          | 3,9997     | -10,9                    | 1,86                     |
| 85 Lamaque 10    | 2,7155 | 3,8325  | 0,17          | 4,0026     | -10,1                    | 1,7                      |
| 85 Lamaque 11    | 3,0098 | 3,8347  | 0,18          | 4,0049     | -9,6                     | 1,84                     |
| <b>Moyenne =</b> |        |         |               |            | <b>-10,9</b>             | <b>Écart type = 0,99</b> |

| Analysis Nr.     | nA     | 11B/10B | 1 sd (permil) | 11/10B cor | $\delta^{11}\text{Bcor}$ | Int. Precision permil    |
|------------------|--------|---------|---------------|------------|--------------------------|--------------------------|
| 87 Lamaque 1     | 2,9083 | 3,8278  | 0,17          | 3,9977     | -11,3                    | 1,68                     |
| 87 Lamaque 2     | 2,9006 | 3,8305  | 0,19          | 4,0006     | -10,6                    | 1,89                     |
| 87 Lamaque 3     | 3,0069 | 3,8307  | 0,15          | 4,0007     | -10,6                    | 1,5                      |
| 87 Lamaque 4     | 3,0186 | 3,8263  | 0,16          | 3,9962     | -11,7                    | 1,64                     |
| 87 Lamaque 5     | 3,037  | 3,8298  | 0,15          | 3,9999     | -10,8                    | 1,45                     |
| 87 Lamaque 6     | 2,992  | 3,8284  | 0,13          | 3,9984     | -11,2                    | 1,34                     |
| 87 Lamaque 7     | 3,015  | 3,8299  | 0,27          | 3,9999     | -10,8                    | 2,69                     |
| 87 Lamaque 8     | 3,0524 | 3,8298  | 0,21          | 3,9998     | -10,8                    | 2,08                     |
| 87 Lamaque 9     | 3,0529 | 3,8293  | 0,17          | 3,9993     | -11                      | 1,72                     |
| 87 Lamaque 10    | 2,9561 | 3,8296  | 0,17          | 3,9996     | -10,9                    | 1,74                     |
| <b>Moyenne =</b> |        |         |               |            | <b>-11</b>               | <b>Écart type = 0,35</b> |
| 88 Lamaque 1     | 3,3652 | 3,823   | 0,18          | 3,9928     | -12,6                    | 1,83                     |
| 88 Lamaque 2     | 3,0136 | 3,8232  | 0,19          | 3,9929     | -12,5                    | 1,92                     |
| 88 Lamaque 3     | 3,0344 | 3,8175  | 0,16          | 3,987      | -14                      | 1,58                     |
| 88 Lamaque 4     | 3,0381 | 3,8269  | 0,22          | 3,9968     | -11,6                    | 2,19                     |
| 88 Lamaque 5     | 3,017  | 3,8227  | 0,12          | 3,9924     | -12,7                    | 1,17                     |
| 88 Lamaque 6     | 3,0196 | 3,8234  | 0,18          | 3,9932     | -12,5                    | 1,76                     |
| 88 Lamaque 7     | 3,0161 | 3,826   | 0,22          | 3,9958     | -11,8                    | 2,21                     |
| 88 Lamaque 8     | 2,998  | 3,8229  | 0,21          | 3,9926     | -12,6                    | 2,12                     |
| <b>Moyenne =</b> |        |         |               |            | <b>-12,5</b>             | <b>Écart type = 0,71</b> |
| 91 Goldex 1      | 3,0107 | 3,8115  | 0,16          | 3,9807     | -15,6                    | 1,63                     |
| 91 Goldex 2      | 3,0141 | 3,8141  | 0,21          | 3,9834     | -14,9                    | 2,07                     |
| 91 Goldex 3      | 3,0189 | 3,8177  | 0,16          | 3,9872     | -13,9                    | 1,57                     |
| 91 Goldex 4      | 2,8762 | 3,8144  | 0,15          | 3,9837     | -14,8                    | 1,53                     |
| 91 Goldex 5      | 2,9311 | 3,8135  | 0,19          | 3,9828     | -15,1                    | 1,9                      |
| 91 Goldex 6      | 3,0262 | 3,8161  | 0,14          | 3,9855     | -14,4                    | 1,42                     |
| 91 Goldex 8      | 2,7796 | 3,8173  | 0,14          | 3,9868     | -14,1                    | 1,41                     |
| 91 Goldex 7      | 2,8338 | 3,816   | 0,17          | 3,9855     | -14,4                    | 1,71                     |
| <b>Moyenne =</b> |        |         |               |            | <b>-14,6</b>             | <b>Écart type = 0,54</b> |

## RÉFÉRENCES

- Bédard, J.H. and Harris, L.B. (2014). Neoarchean disaggregation and reassembly of the Superior craton. *Geology*, 42(11), 951-954.
- Beaudoin, G. and David, P. (2005). Stable isotope geochemistry of the Archean Val-d'Or (Canada) orogenic gold vein field. *Mineralium Deposita*, 40, 59-75. doi: 10.1007/s00126-005-0474-z
- Beaudoin, G., Therrien, R. and Savard, C. (2006). 3D numerical modelling of fluid flow in the Val-d'Or orogenic gold district: major crustal shear zones drain fluids from overpressured vein fields. *Mineralium Deposita*, 41, 82-98.
- Beaudoin G., Rollion-Bard, C., and Giuliani, G. (2013). The boron isotope composition of tourmaline from the Val-d'Or orogenic gold deposits, Québec, Canada. MINERAL DEPOSIT RESEARCH FOR A HIGH-TECH WORLD. 12th SGA Biennial Meeting 2013. Proceedings, 3, 1090-1092.
- Beaudoin, G. and Chiaradia, M. (2016). Fluid mixing in orogenic gold deposits: Evidence from the HO-Sr isotope composition of the Val-d'Or vein field (Abitibi, Canada). *Chemical Geology*, 437, 7-18.
- Bierlein, F.P., Murphy, F.C., Weinberg, R.F. and Lees, T. (2006). Distribution of orogenic gold deposits in relation to fault zones and gravity gradients: targeting tools applied to the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 41(2), 107-126.
- Card, K.D., and Poulsen, K.H.(1998). Geology and mineral deposits of the Superior Province of the Canadian shield. Lucas, S., and St-Onge, M.R., eds., Geology of the Precambrian Superior and Grenville Provinces and Precambrian Fossils in North America: Geological Survey of Canada, Geology of Canada, Volume 7, p. 13-194.
- Chabot, F. (2007). Rapport technique 43-101, évaluation des réserves et ressources au 31 décembre 2006. Mines Richmont, division Beaufor en coparticipation avec la société minière Louvem mars 2007, 1-319.
- Clauer, N. and Chaudhuri, S. (1995). Clays in crustal environments. Isotope tracing and dating : Berlin, Springer-Verlag.
- Corfu, F., Krogh, T., Kwok, Y. and Jensen, L. (1989). U-Pb zircon geochronology in the southwestern Abitibi greenstone belt, Superior Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(9), 1747-1763.

- Couture, J. and Guha, J. (1990). Relative timing of emplacement of an Archean lode-gold deposit in an amphibolite terrane: the Eastmain River deposit, northern Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 27(12), 1621-1636.
- Daigneault, R., Mueller, W. and Chown, E. (2002). Oblique Archean subduction: accretion and exhumation of an oceanic arc during dextral transpression, Southern Volcanic Zone, Abitibi Subprovince Canada. *Precambrian Research*, 115(1), 261-290.
- Daigneault, R., Mueller, W. and Chown, E. (2004). Abitibi greenstone belt plate tectonics: the diachronous history of arc development, accretion and collision. *Developments in Precambrian Geology*, 12, 88-103.
- Davis, D.W. (2002). U–Pb geochronology of Archean metasedimentary rocks in the Pontiac and Abitibi subprovinces, Quebec, constraints on timing, provenance and regional tectonics. *Precambrian Research*, 115(1), 97-117.
- Desrochers, J.-P. and Hubert, C. (1996). Structural evolution and early accretion of the Archean Malartic Composite Block, southern Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 33(11), 1556-1569.
- Dutrow, B.L. and Henry, D.J. (2011). Tourmaline: a geologic DVD. *Elements*, 7(5), 301-306.
- Feng, R. and Kerrich, R. (1992). Geochemical evolution of granitoids from the Archean Abitibi Southern Volcanic Zone and the Pontiac subprovince, Superior Province, Canada: implications for tectonic history and source regions. *Chemical Geology*, 98(1-2), 23-70.
- Foster, G., Pogge von Strandmann, P. and Rae, J. (2010). Boron and magnesium isotopic composition of seawater. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(8).
- Gaboury, D. (1999). Origine volcanogène des veines aurifères riches en sulfures de la mine Géant Dormant, Abitibi, Québec : Université du Québec à Chicoutimi.
- Gaboury, D., Carrier, A., Crevier, M., Pelletier, C. and Sketchley, D.A. (2001). Predictive distribution of fault-fill and extensional veins: example from the Sigma gold mine, Abitibi Subprovince, Canada. *Economic Geology*, 96(6), 1397-1405.
- Garda, G.M., Trumbull, R.B., Beljavskis, P. and Wiedenbeck, M. (2009). Boron isotope composition of tourmalinite and vein tourmalines associated with gold mineralization, Serra do Itaberaba Group, central Ribeira Belt, SE Brazil. *Chemical Geology*, 264(1-4), 207-220. doi: 10.1016/j.chemgeo.2009.03.013
- Genest, R., Lagueux, J.F., Robichaud, F., and Boily, S. (2012). 43-101 Technical Report

- on Production of the M and E Zones at Goldex Mine : Agnico-Eagle Mines Limited, 1-187
- Goldfarb, R.J., Newberry, R.J., Pickthorn, W.J. and Gent, C.A. (1991). Oxygen, hydrogen, and sulfur isotope studies in the Juneau gold belt, southeastern Alaska; constraints on the origin of hydrothermal fluids. *Economic geology*, 86(1), 66-80.
- Goldfarb, R.J., Baker, T., Dube, B., Groves, D.I., Hart, C.J. and Gosselin, P. (2005). Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *Economic Geology 100th anniversary volume*, 40.
- Goldfarb, R.J. and Groves, D.I. (2015). Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233, 2-26.
- Goutier, J., et Melançon, M. (2010) RP 2010-04 Compilation géologique de la Sous-province de l'Abitibi, Ministère de l'Énergie et des Mines du Québec, p. 1.
- Groves, D. (1993). The crustal continuum model for late-Archaeon lode-gold deposits of the Yilgarn Block, Western Australia. *Mineralium deposita*, 28(6), 366-374.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. and Robert, F. (1998). Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13, 7-27.
- Henry, D.J., Novak, M., Hawthorne, F.C., Ertl, A., Dutrow, B.L., Uher, P. and Pezzotta, F. (2011). Nomenclature of the tourmaline-supergrout minerals. *American Mineralogist*, 96(5-6), 895-913. doi: 10.2138/am.2011.3636
- Hitchins, A., Lapointe, A., and Sévigny, P. (2011). 43-101 Technical report on mineral reserve estimate at the Lac Herbin mine. Alexis Minerals Corporation, 1-187.
- Jébrak, M., LeQuentrec, M.F., Mareschal, J.-C. and Blais, D. (1991). A gravity survey across the Bourlamaque massif, southeastern Abitibi greenstone belt, Québec, Canada: the relationship between the geometry of tonalite plutons and associated gold mineralization. *Precambrian Research*, 50(3-4), 261-268.
- Jébrak, M. et Marcoux, É. (2008). *Géologie des ressources minérales* : Ministère des ressources naturelles et de la faune.
- Jemielita, R., Davis, D. and Krogh, T. (1990). U-Pb evidence for Abitibi gold mineralization postdating greenstone magmatism and metamorphism. *Nature*, 346(6287), 831.
- Jenkins, C. et Brown, A. (1999). Cadre métallogénique des gisements de sulfures massifs volcanogènes et filoniens des cantons Bourlamaque et Louvicourt, partie sud de la



sous-Province de l'Abitibi. *Ministère des Ressources naturelles du Québec. Ministère des Ressources naturelles du Québec, MB*, 99-12.

- Jiang, S.-Y. (2001). Boron isotope geochemistry of hydrothermal ore deposits in China: a preliminary study. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9), 851-858.
- Jiang, S.-Y., Radvanec, M., Nakamura, E., Palmer, M., Kobayashi, K., Zhao, H.-X. and Zhao, K.-D. (2008). Chemical and boron isotopic variations of tourmaline in the Hnilec granite-related hydrothermal system, Slovakia: Constraints on magmatic and metamorphic fluid evolution. *Lithos*, 106(1), 1-11.
- Kerrick, R. and King, R. (1993). Hydrothermal zircon and baddeleyite in Val-d'Or Archean mesothermal gold deposits: characteristics, compositions, and fluid-inclusion properties, with implications fortiming of primary gold mineralization. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 30(12), 2334-2351.
- Kerrick, R. and Wyman, D. (1990). Geodynamic setting of mesothermal gold deposits: An association with accretionary tectonic regimes. *Geology*, 18(9), 882-885.
- McCuaig, T.C. and Kerrich, R. (1998). P—T—t—deformation—fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics. *Ore Geology Reviews*, 12(6), 381-453.
- Kerrick, R. and Ludden, J. (2000). The role of fluids during formation and evolution of the southern Superior Province lithosphere: an overview. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 37(2-3), 135-164.
- Large, R.R., Danyushevsky, L., Hollit, C., Maslennikov, V., Meffre, S., Gilbert, S., Bull, S., Scott, R., Emsbo, P. and Thomas, H. (2009). Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits. *Economic Geology*, 104(5), 635-668.
- Latulippe, M. (1966). The relationship of mineralization to Precambrian stratigraphy in the Matagami Lake and Val d'Or districts of Quebec. *Geological Assoc Canada*, 3, 21-42.
- Leeman, W. and Sisson, V. (1996). Geochemistry of boron and its implications for crustal and mantle processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 33(1), 645-707.
- Legault, M. (2004). Synthèse métallogénique et modélisation 3D de la Faille de Porcupine-Destor dans le secteur de Duparquet, Sous-province de l'Abitibi (phase 2 de 3). : [Charlesbourg]: Ressources naturelles, Faune et Parcs, Québec.
- Lemarchand, D., Gaillardet, J., Lewin, E. and Allegre, C. (2000). The influence of rivers

- on marine boron isotopes and implications for reconstructing past ocean pH. *Nature*, 408(6815), 951-954.
- Lemarchand, J. (2012). *Les minéralisations filoniennes aurifères du pluton de Bourlamaque (Val-d'Or, Abitibi): synthèse structurale et apports de la datation 40AR/39AR*. Université du Québec à Montréal.
- Ludden, J., Hubert, C. and Gariépy, C. (1986). The tectonic evolution of the Abitibi greenstone belt of Canada. *Geological Magazine*, 123(02), 153-166.
- Marocchi, M., Marschall, H.R., Konzett, J., Tropper, P., Ludwig, T., Mair, V. and Bargossi, G.M. (2011). Metasomatic tourmaline in hybrid contact-bands between gneiss and peridotite in the Ulten zone of the Eastern Italian Alps: chemistry and boron isotopic composition. *The Canadian Mineralogist*, 49(1), 245-261.
- Marschall, H.R., Meyer, C., Wunder, B., Ludwig, T. and Heinrich, W. (2009). Experimental boron isotope fractionation between tourmaline and fluid: confirmation from in situ analyses by secondary ion mass spectrometry and from Rayleigh fractionation modelling. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(5), 675-681.
- Marschall, H.R. and Jiang, S.-Y. (2011). Tourmaline isotopes: no element left behind. *Elements*, 7(5), 313-319.
- McCuaig, T.C. and Kerrich, R. (1998). P - T - t - deformation - fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics. *Ore Geology Reviews*, 12(6), 381-453.
- McDonough, W.F. and Sun, S.-S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3-4), 223-253.
- Murowchick, J.B. and Barnes, H. (1987). Effects of temperature and degree of supersaturation on pyrite morphology. *American Mineralogist*, 72(11-12), 1241-1250.
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5), 757-775.
- Neumayer P, Hagemann SG, and Couture J-F (2000) Structural setting, textures, and timing of hydrothermal vein systems in the Val d'Or camp, Abitibi, Canada: implications for the evolution of transcrustal, second- and third-order fault zones and gold mineralization. *Can J Earth Science*, 37, 95-114
- Olivo, G.R., Chang, F. and Kyser, T.K. (2006). Formation of the auriferous and barren North Dipper Veins in the Sigma Mine, Val d'Or, Canada: constraints from structural, mineralogical, fluid Inclusion, and isotopic data. *Economic Geology*,

101(3), 607-631.

- Percival, J.A. (2007). Geology and metallogeny of the Superior Province, Canada. *Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*, 903-928.
- Percival, J.A., Skulski, T., Sanborn-Barrie, M., Stott, G.M., Leclair, A.D., Corkery, M.T. and Boily, M. (2012). Geology and tectonic evolution of the Superior Province, Canada. *Tectonic Styles in Canada: The Lithoprobe Perspective, Special Paper, 49*, 321-378.
- Pilote, P., Mueller, W., Scott, C., Lavoie, S., Champagne, C. et Moorhead, J. (1998). Volcanologie de la formation de Val d'Or et du Groupe de Malartic, sous-Province de l'Abitibi: contraintes géochimiques et géochronologiques. *Ministère des Ressources naturelles du Québec, DV*, 98-05.
- Poirier, S., Roy, L., D'Amours, C., Gaudreault, D., Utiger, M., Ilieva, T., and Bergeron, S. (2015). 43-101 Technical report and fall 2015 mineral resource estimate update for the Lamaque project. Integra Gold Corp., 1-403.
- Poulsen, K.H., Robert, F.o. and Dubé, B. (2000). *Geological classification of Canadian gold deposits*. : Ottawa (Ont.).
- Powell, W., Carmichael, D. and Hodgson, C. (1995). Conditions and timing of metamorphism in the southern Abitibi greenstone belt, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32(6), 787-805.
- Rabeau, O., Royer, J.-J., Jébrak, M. and Cheilletz, A. (2013). Log-uniform distribution of gold deposits along major Archean fault zones. *Mineralium Deposita*, 48(7), 817-824.
- Rafini, S. (2014). Typologie des minéralisations aurifères associées à la Faille de Cadillac. Rapport du projet CONSOREM 2011-01 et 2012-01, 45 .
- Robert, F. and Brown, A.C. (1986). Archean gold-bearing quartz veins at the Sigma Mine, Abitibi greenstone belt, Quebec; Part I, Geologic relations and formation of the vein system. *Economic Geology*, 81(3), 578-592.
- Robert, F. (1989). Internal structure of the Cadillac tectonic zone southeast of Val d'Or, Abitibi greenstone belt, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(12), 2661-2675.
- Robert, F. (1990). Structural setting and control of gold-quartz veins of the Val d'Or area, southeastern Abitibi subprovince. *Gold and base metal mineralization in the Abitibi*.

- Robert, F. (1994). Vein fields in gold districts: The example of Val d'Or, southeastern Abitibi subprovince. *Quebec: Geological Survey of Canada, Current Research Paper*, 295-302.
- Robert, F., Poulsen, K.H., Cassidy, K.F. et Hodgson, C.J. (2005). Gold metallogeny of the Superior and Yilgarn cratons. *Economic geology*, 100, 1001-1033.
- Sauvé, P., Imreh, L. et Trudel, P. (1993). *Description des gîtes d'or de la région de Val-d'Or*. : Ministère de l'énergie et des ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale, Direction de la recherche géologique, Service géologique du Nord-Ouest.
- Scott, C.R., Mueller, W.U. and Pilote, P. (2002). Physical volcanology, stratigraphy, and lithogeochemistry of an Archean volcanic arc: evolution from plume-related volcanism to arc rifting of SE Abitibi Greenstone Belt, Val d'Or, Canada. *Precambrian Research*, 115(1), 223-260.
- Slack, J.F. and Coad, P.R. (1989). Multiple hydrothermal and metamorphic events in the Kidd Creek volcanogenic massive sulphide deposit, Timmins, Ontario: evidence from tourmalines and chlorites. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(4), 694-715.
- Sibson, R.H., Robert, F. and Poulsen, K.H. (1988). High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 16(6), 551-555.
- Sibson, R.H. (2000). Fluid involvement in normal faulting. *Journal of Geodynamics*, 29(3), 469-499.
- Su, Z.-K., Zhao, X.-F., Li, X.-C. and Zhou, M.-F. (2016). Using elemental and boron isotopic compositions of tourmaline to trace fluid evolutions of IOCG systems: The worldclass Dahongshan Fe Cu deposit in SW China. *Chemical Geology*, 441, 265-279.
- Swihart, G.H. and Moore, P.B. (1989). A reconnaissance of the boron isotopic composition of tourmaline. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(4), 911-916.
- Taner, M. and Trudel, P. (1989). Bourlamaque batholith and its gold potential, Val-d'Or, Quebec. *Cim bulletin*, 82(922), 33-42.
- Tessier, A.C. (1990). *Structural evolution and host rock dilation during emplacement of gold-quartz vein at the perron deposit, Val D'Or Quebec*. Queen's University at Kingston.
- Tremblay, A. (2001). Postmineralization faults in the Beaufor gold deposit, Abitibi greenstone belt, Canada: geometry, origin, and tectonic implications for the Val-

- d'Or mining district. *Economic Geology*, 96(3), 509-524.
- Van Hinsberg, V. J., and Schumacher, J.C. (2009). The geothermobarometric potential of tourmaline, based on experimental and natural data. *American Mineralogist*, 94(5-6), 761-770.
- Van Hinsberg, V.J., Henry, D.J. and Marschall, H.R. (2011). Tourmaline: an ideal indicator of its host environment. *The Canadian Mineralogist*, 49(1), 1-16. doi: 10.3749/canmin.49.1.1
- van Hinsberg, V.J., Henry, D.J. and Dutrow, B.L. (2011). Tourmaline as a petrologic forensic mineral: A unique recorder of its geologic past. *Elements*, 7(5), 327-332.
- Van Hunen, J. and Moyen, J.-F. (2012). Archean subduction: fact or fiction? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, 195-219.
- Williams, H.R. (1991). Quetico subprovince, in Thurston, P.C., Williams, H.R., Sutcliffe, R.H., and Stott, G.M., eds., *Geology of Ontario: Ontario Geological Survey, Special Volume 4, Part 1*, p. 383-403.
- Wong, L., Davis, D., Krogh, T. and Robert, F. (1991). UPb zircon and rutile chronology of Archean greenstone formation and gold mineralization in the Val d'Or region, Quebec. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2-4), 325-336.
- Zhang, J., Deng, J., Chen, H.-y., Yang, L.-q., Cooke, D., Danyushevsky, L. and Gong, Q.-j. (2014). LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite from the Chang'an gold deposit, Sanjiang region, China: Implication for ore-forming process. *Gondwana Research*, 26(2), 557-575.